UNITED STATES NATIONAL MUSEUM LIBRARY.

1883. Frank Schwarz

Die Wurzelhaare der Pflanzen. Inaug. Dis.

QK
644
S411
1883
Bot.

QK
644
S411
1883
BOT

Die Wurzelhaare der Pflanzen.

Ein Beitrag zur Biologie und Physiologie dieser Organe.

Habilitationsschrift

welche

nebst den aufgestellten Thesen

mit Genehmigung der

philosophischen Facultät der Königl. Universität Breslau

zur

Erlangung der Venia docendi

am Freitag, den 27. April 1883, Mittags 12 Uhr

in der grossen Aula der Universität

gegen die Herren

Dr. phil. Eidam und Dr. phil. Schumann

öffentlich vertheidigen wird

der Verfasser

Dr. phil. Frank Schwarz.

SMITHSONIAN INSTITUTION
JUL 10 1935
NATIONAL MUSEUM

CANCELLED
NOV 6 1883

Breslau 1883.
Druck der Breslauer Genossenschafts-Buchdruckerei, Eingetr. Gen.,
Ursulinerstrasse 1.

SMITHSONIAN INSTITUTION
JUL 1 0 1935
NATIONAL MUSEUM

581.478 1
S 41

Historische Übersicht.

Bei der Zusammenstellung der älteren Litteratur über das vorliegende Thema war ich häufig gezwungen, auf die Frage nach der Funktion des Wurzelkörpers einzugehen, da ältere Autoren auf die Wurzelhaare nur erst in zweiter Linie Rücksicht nahmen. —

Die erste Erwähnung der Wurzelhaare finden wir bei M. Malpighi.[1] Er hat sie bei der Ulme, der Schwarzpappel, der Weide beobachtet und glaubt in ihnen kleine Röhren vor sich zu haben, in welchen der Nahrungssaft aufsteige und zu den Gefäßen weiter geleitet werde. Er findet sie besonders an jenen Stellen, wo die Erde nicht in unmittelbarem Contact mit der Wurzel steht. Stoßen die Wurzelhaare sodann auf das umgebende Erdreich, so umwachsen sie die einzelnen Bodenpartikelchen und legen sich an dieselben an, so dass sie zwischen letzteren und der Wurzel ausgespannt bleiben. Ein ähnliches Haften der Haare beschreibt Malpighi an den Wurzeln des Epheus.[2]

Fast gleichzeitig (1682) stellte N. Grew in seiner »Anatomy of plants« die Behauptung auf, dass vorzüglich die schwammigen Enden der Wurzeln dazu bestimmt seien, das Einsaugen von Nahrung und Wasser zu besorgen.

Hierzu gesellte sich im Jahre 1768 die Theorie von S. Simon[3], dass die Wurzeln — der Knollengewächse wenigstens — nur Ausscheidungsorgane

1) M. Malpighii opera omnia. Tom. I, altera pars. 1687. p. 156.
2) l. c. p. 140.
3) Zuerst ausgesprochen in seinem Buche: Des Jacintes. 1768. p. 16 ff.

seien, um den überflüssigen Bildungssaft aus der Pflanze zu entfernen. Diese drei Ansichten bildeten die Grundlagen der späteren Forschungen. Hales (1727) und de la Baisse (1733) suchten durch ihre Versuche zu beweisen, dass die größte Menge von Wasser durch die Wurzelspitze aufgesogen werde, während den Wurzelhaaren nur eine untergeordnete Bedeutung zukomme. Senebier [1]) ging noch weiter und bezeichnete als aufsaugendes Organ nur das mit unserer Wurzelhaube identische Wurzelschwämmchen. Eine Ansicht, welcher sich auch Treviranus [2]) anschloss.

Von S. J. Brugmans [3]) und A. P. de Candolle [4]) wurden nun aber gerade diese aufgequollenen Membrantheile der Wurzelhaube für das schleimige, von der Wurzel ausgeschiedene Sekret gehalten, wodurch naturgemäß wieder die wasseraufsaugende Funktion der Wurzelhaare zu Ehren kam.

Unter den ziemlich zahlreichen, nichts Neues producirenden Autoren aus den ersten zwanzig Jahren unseres Jahrhunderts seien nur noch Carradori († 1818) [5]) und Moldenhawer hervorgehoben. Ersterer machte die Beobachtung, dass die Wurzelhaare im Wasser fehlen, woraus er die unmotivirte Schlussfolgerung zog, dass sie überhaupt nicht im Stande wären flüssiges Wasser aufzunehmen, sondern dass sie nur zum Aufsaugen der Luftfeuchtigkeit dienten. Das flüssige Wasser dagegen soll vom Schwämmchen aufgenommen werden. [6]) Nach Moldenhawer [7]) sind die Wurzelhaare den Drüsenhaaren der Blätter zu vergleichen. Sie sollen eine Flüssigkeit absondern, die als Auflösungsmittel der Nährstoffe diene und gewissermaßen dem Speichel der Thiere zu vergleichen sei.

Die erste im wesentlichen richtige Beschreibung der Wurzelhaare gab F. Meyen. [8]) Er ging aus von den aufsaugenden Haaren der Moose und Characeen, darauf hinweisend, dass in diesen Fällen die Wurzelhaare vollständig die Stelle der Wurzeln vertreten. Er hob ferner die allgemeine Verbreitung der Wurzelhaare bei den höheren Pflanzen hervor, untersuchte ihre Entwicklung und, was das Wichtigste ist, er ließ direct gewisse Flüssigkeiten von den Haaren aufsaugen. Er kam auf diese Art zu der Ansicht, dass die Wurzelhaare nur dazu bestimmt seien, die Oberfläche der Wurzel zu ver-

---

1) In seiner Physiologie végétale. 1800.

2) Physiologie der Gewächse. 1835. Bd. I, p. 391.

3) De mutata humorum in regno organico indole a vi vitali vasorum derivanda. 1789.

4) Organographie der Gewächse. 1828. p. 98 (p. 117 des franz. Originals).

5) Degli organi assorbenti delle radice osserv. present. alla Soc. dei Georgofili di Firenze. Citirt nach de Candolle, Organographie végétale p. 117. (p. 98 der deutschen Übersetzung.)

6) Diese Ansicht wurde erst im Jahre 1837 von Ohlert beseitigt (Linnaea, 11. Bd. p. 627).

7) J. P. Moldenhawer, Beiträge zur Anatomie der Pflanzen. 1812. p. 319.

8) Neues System der Pflanzenphysiologie. 1838. Bd. II, p. 6ff.

größern. Ohne weiter darauf einzugehen, erwähnt er, dass die Zahl der gebildeten Haare wahrscheinlich von äußeren Verhältnissen bedingt sei.

Die jetzt zu nennende Arbeit von G. Gasparrini »Richerche sulla natura dei succiatori e la escrezione delle radici« 1856 ist zwar die umfassendste Bearbeitung der Wurzelhaare, bietet jedoch im Einzelnen wenig Neues. Gasparrini hat eine ziemlich große Anzahl von Pflanzen untersucht und mit wenig Ausnahmen überall Wurzelhaare gefunden. Auf die Bedingungen der Wurzelhaarbildung geht er nicht weiter ein, sondern begnügt sich damit, ihre Form, ihren Inhalt u. s. w. zu beschreiben. Die feinsten, in eine gummiartige Masse eingebetteten Erdtheilchen, welche an den Wurzelhaaren haften, hielt er für Ausscheidungsprodukte aus den Haaren. Er ließ sich durch diese vorgefasste Meinung sogar dazu verleiten, Wurzelhaare zu zeichnen (l. c. Taf. VIII), die mit einem abspringenden Deckel versehen sind.

Schacht hat die wesentlicheren Angaben Gasparrini's über die Wurzelhaare in seinem Lehrbuche der Anatomie und Physiologie 1859 II. Theil p. 151 ff. mitgetheilt.

Weit präciser als seine Vorgänger hat Sachs[1]) die Bedeutung und die Funktion der Wurzelhaare klargelegt. Er zeigte, wie die Wurzelhaare mit den Bodentheilchen verwachsen, wodurch die Aufnahme von Nährstoffen naturgemäß sehr erleichtert wird. Durch die nahe Berührung mit den die Bodenpartikelchen umgebenden Wasserschichten wird die Aufsaugung von Flüssigkeiten bewerkstelligt. Ferner hat Sachs das Verdienst, die Auflösung von Gesteinen durch die Wurzeln und ihre Haare unter Vermittlung einer Säurewirkung bewiesen zu haben.[2])

Von den in neuester Zeit erschienenen Arbeiten über Wurzelhaare sind die Abhandlungen von Persecke und Mer zu berücksichtigen, welche die Bildungsbedingungen der Wurzelhaare betreffen. Da ich weiter unten auf diese Arbeiten zurückkommen muss, seien dieselben an dieser Stelle nur kurz erwähnt.

Ich habe in der vorliegenden Untersuchung hauptsächlich auf das Vorkommen und die Bildungsbedingungen der Wurzelhaare Rücksicht genommen, womit nothwendiger Weise eine anatomische Untersuchung dieser Organe verbunden sein musste. Durch Hereinziehung biologischer und physiologischer Momente habe ich es zugleich versucht, eine Erklärung der gefundenen Thatsachen zu geben.

Zur besseren Übersicht gliederte ich meine Arbeit in folgende Abschnitte:

1. Bestimmung und Zweck der Wurzelhaare.

---

1) Handbuch der Experimentalphysiologie. 1865. p. 170. 182.

2) Bot. Zeitung. 1860. p. 118—119. Experimentalphysiologie p. 188.

2. Abhängigkeit der Wurzelhaarbildung von äußeren Faktoren.

3. Das Vorkommen der Wurzelhaare.

4. Anatomie der Wurzelhaare.

Bestimmung und Zweck der Wurzelhaare.

Habitus der Wurzel mit und ohne Haare. — Aufnahme von Nahrung und Wasser. — Vergrößerung der Wurzeloberfläche. — Wurzelhaarbildung als Selbstregulation. — Eindringen der Haare zwischen die Bodentheilchen und die dabei in Betracht kommenden Faktoren. — Verwachsung und Beklebung der Haare mit Erdtheilchen. — Nachweis der dabei wirksamen Schleimschicht und ihre Eigenschaften. — Permeabilität der Wurzelhaarmembran. — Absterben der Haare bei einem bestimmten Alter der Wurzel. — Tod der Haare durch äußere Einwirkungen. — Befestigung der Wurzel im Boden. — Bedeutung der Haare für das Eindringen der Keimlingswurzel. — Vorwärtsdringen der Wurzel im Boden. — Erklärung, warum die Wurzelspitze meist frei von Haaren ist.

Nehmen wir eine im Freien gewachsene Pflanze mit ihren Wurzeln aus der Erde und machen den Versuch, die daran haftenden Bodenpartikelchen abzuschütteln oder abzuwaschen, so werden wir bald sehen, dass uns dies nicht an allen Stellen der Wurzel gelingt. Jene Theile der Wurzel, welche mit jungen lebenskräftigen Haaren versehen sind, bleiben umgeben von einer aus einzelnen Bodentheilchen gebildeten Hülle, vergleichbar einem Höschen, welches die Wurzel bedeckt. Fast ausnahmslos ist die Spitze der Wurzel frei von Haaren, in Folge dessen sie meist rein weiß erscheint, während die älteren Theile der Wurzel ein mehr der Erdfarbe entsprechendes Aussehen haben, was eben davon herrührt, dass die äußerste die Haare tragende Rindenschicht der Wurzel abgestorben und braun gefärbt ist. Das eben Gesagte gilt jedoch nicht für alle Pflanzen, sondern bloß für diejenigen, welche in einem verhältnissmäßig trockenen Boden gewachsen sind. Bei größerer Feuchtigkeit des Bodens sehen wir die Wurzel auch innerhalb der sonst mit lebenden Haaren versehenen Region nur stellenweise von einer Erdhülle umgeben, die sich durch Wasser leicht abspülen lässt. Andere Theile der Wurzeln sind gänzlich frei von Haaren, die Epidermis der Wurzel vollständig glatt. Ähnlich ist es bei Zwiebelgewächsen, Sumpfpflanzen und einigen anderen, erst später zu nennenden Pflanzengruppen.

Ohne vorläufig auf die Ursachen dieser Erscheinungen einzugehen, ersehen wir daraus, dass die Wurzelhaarbildung unter verschiedenen äuße-

ren Bedingungen nicht gleichmäßig vor sich geht, und dass die Wurzel im Stande ist, zu funktioniren, auch ohne Haare.

Die beiden hier in Betracht kommenden Funktionen der Wurzel sind erstens die Aufnahme von Nahrung, Wasser etc., zweitens die Befestigung der Pflanze am Substrat.

Fassen wir nun zunächst die Aufnahme von anorganischer Nahrung und Wasser ins Auge, so müssen wir uns vergegenwärtigen, dass das Wurzelsystem ein in der Erde mehr weniger verbreitetes, weitmaschiges Netz darstellt, dem die Aufgabe zufällt, die einzelnen Schichten und Lagen des Bodens auch auf einige Entfernung hin für die Pflanze nutzbar zu machen. Fehlen nun die Wurzelhaare, so bleibt der zwischen den einzelnen Auszweigungen der Wurzel liegende Theil des Bodens unausgenützt. Dieser Mangel wird sich nicht bemerkbar machen, sobald Wasser und anorganische Nährstoffe für die Pflanze leicht zugänglich sind. Dies findet jedoch constant nur seltener statt, womit denn auch meist ein Fehlen der Haare verbunden ist. Die Regel ist, dass den einzelnen Bodenpartikelchen das Wasser sowohl als die Nährsalze förmlich entrissen werden müssen, da dieselben ja mit einer gewissen Kraft festgehalten werden. Je größer nun die Oberfläche der Wurzel ist, und je inniger der Contact mit den Bodentheilchen, desto besser wird der Zweck der Wurzel erfüllt werden. Beides wird erreicht durch die Ausbildung der Wurzelhaare.

Um mir eine Vorstellung von der Vergrößerung der Oberfläche durch die Wurzelhaare zu verschaffen, ließ ich Wurzeln von Mais und Erbsen in feuchter Luft wachsen, wo die Menge der gebildeten Haare am größten ist. Zur Bestimmung der Oberfläche war es natürlich vor Allem nothwendig, die Zahl der Haare zu ermitteln, was am leichtesten an dünnen Querschnitten geschah. Sodann wurde die Dicke eines solchen Querschnittes gemessen, und die Zahl der Haare für die Wurzellänge eines Millimeters berechnet. Es stellte sich heraus, dass die größte Differenz zwischen den einzelnen Zählungen, z. B. bei Maispflanzen (an scheinbar gleichmäßig behaarten Wurzeln) 150 nicht überschritt, was bei einer Zahl von ungefähr 2000 Haaren wenig in Betracht kommt. Als Länge und Durchmesser der Wurzelhaare wurden Mittelwerthe aus mindestens 12 Messungen genommen.

Zea mais.

(Im feuchten Raume gewachsene Wurzel.)

Mittlere Anzahl der Wurzelhaare auf 1 mm Wurzellänge 1925 (Mittel aus 3 Zählungen).
Länge der Wurzelhaare 0·31 mm.
Durchmesser der Wurzelhaare 0·011 mm.
Durchmesser der Wurzel 1·44 mm.

Zahl der Haare auf 1 qmm Wurzelfläche 425.
Oberfläche der Wurzel für 1 mm Länge
ohne Haare 4·52 qmm,
mit Haaren 25·13 qmm.
Die Oberfläche der behaarten Wurzel ist $5^1/_2$ mal größer.

Pisum sativum.

(Im feuchten Raume gewachsene Wurzel.)

Zahl der Wurzelhaare auf 1 mm Wurzellänge 1094 (Mittel aus 4 Zählungen).
Länge der Wurzelhaare 1·2 mm.
Durchmesser der Wurzelhaare 0·013 mm.
Durchmesser der Wurzel 1·5 mm.
Zahl der Haare auf 1 qmm Wurzelfläche 232.
Oberfläche der Wurzel für 1 mm Länge
ohne Haare 4·71 qmm,
mit Haaren 58·33 qmm.
Die Oberfläche der behaarten Wurzel ist 12·4mal größer.

Scindapsus pinnatus.

(Luftwurzel.)

Zahl der Wurzelhaare auf 1 mm Wurzellänge 4386 (Mittel aus 3 Zählungen).
Länge der Wurzelhaare 1·2 mm.
Durchmesser der Wurzelhaare 0·015 mm.
Durchmesser der Wurzel 2·2 mm.
Zahl der Haare auf 1 qmm Wurzelfläche 313.
Oberfläche der Wurzel für 1 mm Länge
ohne Haare 14·02 qmm,
mit Haaren 261·9 qmm.
Die Oberfläche der behaarten Wurzel ist 18·7 mal größer.

Trianea bogotensis.

(Im Wasser gewachsene Nebenwurzel.)

Bei der geringen Anzahl und der Größe der Wurzelhaare kann ihre Zahl an der Wurzel ziemlich genau bestimmt werden, ohne dass man Schnitte machte.

Länge der Wurzel 7·6 mm.
Durchmesser der Wurzel 0·36 mm.
Zahl der Wurzelhaare darauf 94.

Länge der Wurzelhaare 3·25 mm.
Durchmesser der Wurzelhaare 0·05 mm.
Zahl der Haare auf 1 qmm Wurzelfläche 10·9.
Oberfläche der Wurzel für die Länge von 7·6 mm
ohne Haare 8·58 qmm.
mit Haaren 56·9 qmm.
Die Oberfläche der behaarten Wurzel ist 6·63 mal größer.

Wie stark die Oberfläche der Wurzel vergrößert wird, hängt sowohl von der Zahl als der Länge und Breite der Wurzelhaare ab. Eine Wurzel, die sehr zahlreiche, aber kleine Haare bildet, erreicht dasselbe als eine Wurzel mit weniger, aber größeren Haaren. Es zeigen uns dies die angeführten Bestimmungen an den Wurzeln von Zea mais und Trianea bogotensis. Im ersteren Falle kommen 425 kurze Haare auf 1 qmm, im letzteren Falle nur 11, aber sehr lange und umfangreiche Haare auf dieselbe Fläche. Die Vergrößerung der Oberfläche variirt um Weniges.

Bei Pisum ist die Oberfläche der Wurzel, trotzdem die Anzahl der Haare eine geringere ist, doch bedeutend stärker vergrößert, als beim Mais, weil die Wurzelhaare hier eine größere Länge erreichen.

Den Hauptvortheil gewährt diese Flächenvergrößerung durch Haare, indem die Menge der producirten Haare je nach dem Bedarf der Pflanze variirt. Insofern besteht eine Art Selbstregulation, dass die Haare bei großer Feuchtigkeit des Bodens, also bei erleichterter Zufuhr von Wasser u. s. w., nur in geringer Menge gebildet werden, während die Zahl derselben mit verminderter Feuchtigkeit zunimmt. Die Wurzelhaare sind daher im feuchten Raume nicht nur am zahlreichsten, sondern erreichen hier auch die größte Länge. Mit zunehmender Feuchtigkeit, d. h. mit Erleichterung der Wasserzufuhr, nimmt die Menge der gebildeten Haare ab. Tritt ein Mangel an organischen Nährstoffen ein, kann die Pflanze auch schon bei geringeren Feuchtigkeitsgraden die Wurzelhaarbildung einstellen und auf diese Art Baumaterial sparen.

Ebenso wichtig wie die Vergrößerung der Wurzelfläche ist die Vervollständigung des Contactes mit den Bodenpartikelchen, welche durch die Wurzelhaare erreicht wird. Die Wurzelhaare sind schon vermöge ihrer geringen Größe im Stande, zwischen die kleinsten Erdpartikelchen einzudringen. Wie wir im letzten Abschnitte meiner Arbeit sehen werden, wird dieses Eindringen noch durch verschiedene specifische Eigenschaften des Wurzelhaares unterstützt. Das Wurzelhaar hat das Bestreben, sich in der Richtung senkrecht zur Oberfläche der Wurzel zu verlängern. Stößt es auf einen festen unverrückbaren Körper, so wächst es längs desselben weiter. Hört nun der Widerstand auf, sucht es parallel seiner ursprünglichen Richtung weiter zu wachsen. Auf diese Art ist es im Stande, die einzelnen Lücken des Bodens zu benutzen und in ihnen vorzudringen.

Ferner macht das Haar leicht nutationsähnliche Krümmungen, welche ihm ebenfalls ein Eindringen in den Boden erleichtern.

Durch Feuchtigkeitsdifferenzen werden die Wurzelhaare zu keinen hydrotropischen Krümmungen veranlasst. Man kann dies an Luftwurzeln beobachten, die an feuchten Wänden hinabwachsen. Die Haare stehen alle senkrecht auf der Wurzelfläche und wachsen so lange geradlinig weiter, bis sie mit der Wand in Berührung kommen.

Dasselbe Resultat erhält man, wenn man Wurzeln von Pisum oder von Mais an feuchten Torfplatten wachsen lässt. Ebenso verändern die Haare von Wurzeln, die zwischen zwei Torfplatten wachsen, nur dann ihre Wachsthumsrichtung, wenn sie direkt auf den festen Körper stoßen. Die über Wasser in feuchter Luft befindlichen Haare (wo ein Theil der Wurzel in's Wasser ragt) wachsen, ohne eine Ablenkung zu zeigen, parallel der Wasserfläche weiter.

Ist das Haar zwischen die Bodentheilchen eingedrungen, so wird durch die Beklebung desselben mit den Erdkörnchen ein noch innigerer Contact erzielt. Ein Theil dieser Erdpartikelchen, und zwar meistens die gröberen Körnchen, wird dadurch festgehalten, dass das Wurzelhaar sie umschlingt und mit ihnen förmlich verwächst, wie wir dies an den Fig. 3 und 7 sehen. Der bei weitem größere Theil der Erdhülle haftet jedoch nur an der Oberfläche des Wurzelhaares.

Dieses Haften der Erdtheilchen wird durch die Verschleimung der äußersten Schicht der Membran erreicht.

Die Membran des Wurzelhaares besteht aus zwei Theilen: einer inneren scharf abgegrenzten, bestimmt contourirten Schicht, die sich mit Chlorzinkjod meist blau färbt, und einer äußeren, im ungefärbten Zustande schwer zu unterscheidenden, veränderlichen Schleimlage. Dieselbe färbt sich mit Chlorzinkjod gelblich braun. Sie entspricht der Cuticula oberirdischer Pflanzentheile und in der That sehen wir z. B. an den Außenwänden von Maiswurzeln, die aus Stengelknoten entspringen, eine deutliche Cuticula ausgebildet, so lange die Wurzel in Berührung mit Luft steht, während sich an den in der Erde befindlichen Außenzellen der Rinde nur die erwähnte Schleimschicht befindet.

Besonders schön sieht man die Zweischichtigkeit der Wurzelhaarmembran an den Haaren von Taxus baccata. Dieselben verhalten sich unter dem Mikroskop optisch verschieden. Die innere Lage erscheint auf dem optischen Querschnitt roth, die äußere blau.

Will man bei anderen Pflanzen diese Schleimschicht nachweisen, ist es nothwendig, nur in sehr trockener Erde gewachsene Haare zu untersuchen, da bei etwas größerer Feuchtigkeit ein zu starkes Aufquellen, eventuell eine Lösung resp. Vertheilung des Schleimes eintritt.[1])

1) Mit Jod, mit Jodschwefelsäure, verdünnten Anilinlösungen tritt keine Färbung ein. Dagegen fand ich, dass diese gummöse Schicht sich durch eine wässerige oder

Es mag dies der Grund sein, weshalb wir weder bei Sumpf- und Wassergewächsen, noch bei in sehr feuchter Erde erzogenen Landpflanzen eine Beklebung der Wurzelhaare finden. Es gibt jedoch auch Pflanzen, an deren Wurzelhaaren überhaupt niemals Erdtheilchen haften. Zu diesen gehören Tradescantia erecta, Thesium pratense, Allium fistulosum, Lilium candidum, Ranunculus ficaria.

Diese Eigenschaft der leichten Quellbarkeit setzt die Wurzelhaarmembran in den Stand, selbst die kleinsten Körnchen und Bodentheilchen zu umgeben und einzuschließen. Verweilt die Wurzel längere Zeit in trockenem Boden, so zieht sich die Gallerthülle zusammen und wird nach längerer Zeit starr. An jenen Stellen (vgl. Fig. 5), wo nur wenig oder kleine Körnchen haften, finden wir daher dieselben entweder an der Außenseite der Gallertschicht kleben oder etwas in diese Schicht eingedrückt, so dass sie fast auf der inneren Membranschicht liegen. Andere Stellen, die mehr beklebt sind, zeigen hier größere und kleinere Körnchen resp. Erdpartikelchen in einer hyalinen Schicht liegen, welche wir als identisch mit der eben besprochenen Gallertschicht erkennen. Dass die Körnchen wirklich festgehalten werden, wird uns auch noch dadurch bewiesen, dass wir selbst an den kleinsten Körnchen niemals die Brown'sche Bewegung wahrnehmen. Nach der Erstarrung der Gallertschicht bringt selbst die Behandlung mit Kali nur ein schwaches Aufquellen zu Stande. Nur zwischen der inneren Membran und der Schicht anhaftender Körnchen nimmt man einen schmalen Saum wahr.

Die Gallerthülle hat keine eigentlich klebenden Eigenschaften, sondern befestigt die einzelnen Theilchen nur durch das Umfließen. Wir ersehen dies daraus, dass kleine Körnchen, auf Wurzelhaare gestreut, an denselben nicht kleben blieben, sondern selbst nach längerer Berührung leicht abgespült werden konnten. Lässt man dagegen eine mit Wurzelhaaren versehene Wurzel auf einem festen Gegenstande langsam eintrocknen, so haften die Haare außerordentlich fest an demselben und können nur mit einiger Gewalt abgerissen werden.

besser noch alkoholische Lösung von Carminsäure schön roth färbt. Dieses aus der Cochenille dargestellte Präparat eignet sich vorzüglich zur Färbung von derartigen gummösen Substanzen. Etwas weniger gut färbt Carthamin, der Farbstoff des Safflor. Man löst etwas von diesem Farbstoff in wenig kohlensaurem Natron und neutralisirt sodann mittelst Citronensäure. Besonders wird Cellulose schön tingirt. Sehr vortheilhaft ist auch die Färbung mit Anilinschwarz, wodurch die Gallerthülle violett erscheint. Will man andere Anilinfarben anwenden, ist es nothwendig, die Wurzeln 12—18 Stunden in einer Gerbstofflösung liegen zu lassen. Wendet man nach diesem Einlegen z. B. Methylgrün an, so erscheint die innere Membran zufolge ihres stärkeren Lichtbrechungsvermögens mehr gelblich, während die äußere gummöse Schicht blassgrün erscheint. Nach längerem Liegen (14 Stunden) in dem Farbstoff nahm die äußere Membran eine mehr blaue Farbe an, wodurch sie sich noch besser abhob. Hämatoxylinlösung (zu gleichen Theilen Wasser und Alkohol) färbte die innere Membran röthlich, die äußere Schicht violett.

Der Vortheil, den eine Umhüllung mit einer solchen Gallerte gewähren muss, ist ein in die Augen springender. Erstens kann sich die von der Wurzel ausgeschiedene Säure leicht in dieser Schicht verbreiten und so lösend auf die Bodenpartikelchen wirken, zweitens muss die Gallertschicht dem Haare einen gewissen Schutz vor zu schnellem oder plötzlichem Austrocknen gewähren. Es wäre dies eine Analogie zu den z. B. am Scheitel von Riccia vorkommenden Schleimmassen, welche den Zweck haben, durch Ansammlung von Flüssigkeit den zarten Scheitel zu schützen.

Man könnte glauben, dass durch eine derartige Umhüllung des Wurzelhaares der Durchgang gelöster Stoffe erschwert würde; dies findet jedoch nicht statt. Wir erkennen dies aus der Leichtigkeit, mit der Farbstoffe, die zur inneren Celluloseschicht gelangten, beim Einlegen in Wasser wieder ausgewaschen wurden.

Die innere sehr dünne Membranschicht ist ebenfalls sehr permeabel. Salzlösungen dringen binnen kurzer Zeit ein und bewirken die bekannte Contraction des Inhaltes. Ebenso tritt sehr schnell durch Verdunstung ein Collabiren des Haares ein, sobald es einer zu trockenen Atmosphäre ausgesetzt ist, was man sich bei der Zartheit der Membran leicht erklären kann. Die Dicke derselben schwankt bei den von mir untersuchten Pflanzen zwischen 0·0006—0·0010 mm, und nur bei den Haaren der Luftwurzeln war sie um ein geringes stärker (bis zu 0·0012).

Diese Zartheit der Wurzelhaare hat jedenfalls große Vortheile für die Stoffaufnahme. Zugleich tritt aber sehr leicht ein Absterben derselben ein. Hat eine bestimmte Stelle der Wurzel ein gewisses Alter erreicht, gehen alle Haare zu Grunde. Die Wurzelhaare collabiren, bräunen sich und werden schließlich vollständig desorganisirt. Zugleich stirbt die Epidermis der Wurzel ab. Dieses Absterben erfolgt noch vor der Peridermbildung unter der Oberfläche der Wurzel und ist unabhängig von derselben. Es erfolgt, ob die Wurzel in Wasser, in feuchter oder trockener Erde vegetirt. Bei Maispflanzen blieben die Haare bis zu einer Länge von 20 cm von der Wurzelspitze an gerechnet noch turgescent, während sie bei anderen dünneren Wurzeln, z. B. von Avena sativa, schon 6—10 cm hinter der Wurzelspitze collabirt waren. Auch an Luftwurzeln erfolgt das Absterben der Haare schon in geringerer Entfernung.

Wir dürfen uns jedoch nicht vorstellen, dass die Wurzelhaare bis zu diesen Grenzen sämmtlich lebendig bleiben, da äußere Bedingungen und Einflüsse sehr leicht den Tod dieser Organe hervorrufen. Im feuchten Raume sterben dieselben schon nach 4—5 Tagen ab.

Auch beim plötzlichen Wechsel von großer Feuchtigkeit und Trockenheit gehen viele Haare zu Grunde. Namentlich findet dies statt, wenn man die Haare von den in Wasser gewachsenen Wurzeln in feuchte Luft bringt. Beim umgekehrten Umsetzen von feuchter Luft in Wasser bleiben die jünge-

ren Haare erhalten und nur die älteren sterben ab. Das Absterben der Haare bei einem solchen Wechsel ist nicht nothwendig mit dem Zugrundegehen der ganzen Wurzel verbunden, wenn letzteres auch in einzelnen Fällen eintritt. Nach dem Vorgange von Sachs hat man angenommen, dass beim Umsetzen der Wurzeln aus Erde eine große Zahl von Haaren abgerissen würde und hiedurch die ganze Wurzel zu Grunde ginge, sobald sie dann in Wasser oder sehr feuchte Erde käme. Bei sehr trockener auseinanderfallender Erde kann man ein solches Abreißen der Haare vollständig vermeiden und trotzdem gehen die Wurzeln gewisser Pflanzen beim Umsetzen zu Grunde. Die aus dem feuchten Raume in Wasser gebrachten Haare platzen häufig und sterben auf diese Art ab.

In gleicher Weise, wie die Stoffaufnahme durch die Wurzel vermittelst der Wurzelhaare erst vervollständigt wird, gewähren die Haare auch für die Befestigung der Wurzel im Boden gewisse Vortheile. Da es viele Wurzeln ohne Haare gibt, die trotzdem funktionsfähig sind, ist es von vorn herein klar, dass solche Wurzeln auch ohne Haare in den Boden einzudringen vermögen.

Ebenso leuchtet dagegen ein, dass ein Herausziehen der Wurzel aus dem Boden durch die Haare sehr erschwert wird, und dass die Wurzelhaare der vorwärts dringenden Wurzel einen gewissen Widerhalt gegen die Widerstände des Bodens gewähren müssen. Bedarf es doch auch einer geringeren Kraft, einen glatten Stock aus der Erde zu ziehen, als wenn dieser vermittelst kleiner Widerhaken in dem Boden befestigt wäre.

Ein Herausschieben der Wurzel kann man sehr leicht bei jungen Keimpflanzen sehen, wenn die Wurzel in Folge großer Feuchtigkeit haarlos geblieben ist und der Widerstand des Bodens ziemlich groß. Da nun aber die Wurzel über dem Boden gewissermaßen in einem feuchten Raume wächst, bedeckt sie sich hier mit zahlreichen Haaren, die dann das Eindringen der Wurzel erleichtern.

Wie schon Darwin[1]) erwähnt, dienen Wurzelhaare häufig dazu, den keimenden Samen an Steinen und anderen festen Gegenständen zu befestigen und so das Eindringen der ersten Wurzel in den Boden zu unterstützen. Wir werden in dem Abschnitte über das Vorkommen der Wurzelhaare mehrere Fälle kennen lernen, wo eine besondere Anhäufung von Wurzelhaaren an bestimmten Stellen von Keimpflanzen für eine specielle Anpassung an den eben genannten Zweck spricht. Es sei hier nur darauf verwiesen.

Wichtiger ist die Beihilfe, welche die Wurzelhaare beim weiteren Vorwärtsdringen der Wurzel im Boden gewähren. Dieselben sollen einen Halt gegen die Widerstände des Bodens bilden. Dabei ist es jedoch

---

1) Ch. Darwin, Das Bewegungsvermögen der Pflanzen. 1881. p. 471—472.

von Wichtigkeit, dass die Beweglichkeit der Wurzelspitze nicht gehindert werde. Die durch Contact, Feuchtigkeit, Schwerkraft inducirten Reize würden zum Theil illusorisch, wenn die Wurzelspitze durch Wurzelhaare an die Bodentheilchen angeheftet wäre. Ebenso könnte hiedurch das Wachsthum der Wurzel gehemmt werden. Wir sehen daher die Wurzelhaare fast überall erst in einiger Entfernung unterhalb der Wurzelspitze auftreten. Interessant ist es nun, wie bei langsamem Wachsthum und bei großen Bodenwiderständen die Wurzelhaare näher an die Spitze heranrücken, als bei leichtem Vordringen der Wurzel. Ebenso bedarf eine dünnere Wurzel eines besseren Widerhaltes, weil sie leichter einem Abbiegen ausgesetzt ist, weshalb auch hier der Abstand der ersten Haare von der Wurzelspitze ein geringerer ist.

Einige Zahlen mögen dies beweisen:

Pisum sativum. Hauptwurzel.

	Beginn der ersten Wurzelhaare hinter der Spitze.
In Kanälen, welche in feuchte Sägespäne gestoßen waren, wachsend, Wachsthum sehr schnell, Widerstand des Bodens 0	8, 9.8, 11, 13.7 mm
In Erde wachsend, welche ziemlich trocken war, Wachsthum gehemmt, Widerstand des Bodens groß.	3.4, 2.1, 2.8, 4 mm

Zea mais. Hauptwurzel.

	Beginn der ersten Wurzelhaare hinter der Spitze.
Im feuchten Raum	7—8 mm
In feuchter Erde	3.4, 3.7, 3.2, 6.9, 3.7 mm

Absichtlich habe ich hier nur die im Allgemeinen ungefähr gleich dicken Hauptwurzeln mit einander verglichen, da zwischen den dicken Haupt- und Nebenwurzeln einerseits und den feineren Nebenwurzeln andererseits ein bedeutender Unterschied besteht.

Zea mais (die Pflanze wurde jeden Tag begossen).

Nackte Spitze.
Hauptwurzel: 3·7, 3·4, 3·7 mm.
Starke Nebenwurzel: 3·4, 3·0, 2·9 mm.
Feine Nebenwurzel: 0·6, 0·5, 1·0 mm.

Pisum sativum (die Pflanze wurde jeden dritten Tag begossen).

Nackte Spitze.
Hauptwurzel: 3·4, 3·0 mm.
Starke Nebenwurzel: 3·8, 3·7, 3·8 mm.
Feine Nebenwurzel: 1·1, 1·9, 1·5, 1·8, 1·3 mm.

Die Regel ist, dass die Wurzelhaare bei langsamerem Wachsthum $^3/_4$—1 mm, bei schnellerem Wachsthum 2—3 mm hinter der Wurzelspitze beginnen. Bei sehr zarten Wurzeln, z. B. bei Poa pratensis, waren die ersten Haare nur 0·11 mm von der Wurzelspitze entfernt.

An der äußersten Spitze der Wurzel werden Haare nur bei einigen Crassulaceen gebildet, z. B. bei Sedum Andersoni, Sempervivum Funkii, und nach den Angaben von Westermaier und Ambronn [1]) auch bei Azolla caroliniana.

Bei den Crassulaceen sind diese merkwürdigen Ausnahmen von der sonst so allgemeinen Regel wohl dadurch verursacht, dass jene Pflanzen immer nur in sehr harter trockener Erde wachsen, die ihrem Vorwärtsdringen einen bedeutenden Widerstand entgegensetzt. Bei Azolla, wo die Haare erst nach dem Abwerfen der Wurzelhaube entstehen, mag die Zartheit der Wurzel eine derartige Einrichtung vortheilhaft erscheinen lassen.

Die Beobachtung der hier angeführten Thatsachen wird dadurch erschwert, dass unter gewissen Bedingungen, wie z. B. bei zu großer Feuchtigkeit, die Haarbildung stellenweise ganz unterbleibt. Es wird daher leicht eine zu große haarlose Strecke beobachtet.

Eine Erklärung der Thatsache wird uns dadurch gegeben, dass bei langsamem Wachsthum überhaupt, auch wenn der Widerstand des Bodens 0 ist, die Haare näher an die Spitze heranrücken. Wir können dies an Pflanzen sehen, von denen nur der untere Theil des Wurzelsystems in Wasser ragt, während die übrigen neu entstehenden Wurzeln sich im feuchten Raume befinden. Die meisten Nebenwurzeln zeigten eine nackte Spitze von $2^1/_2$—3 mm, während bei schnellem Wachsthum im feuchten Raume die nackte Spitze 5—6 mm betrug.

---

1) Über eine biologische Eigenthümlichkeit der Azolla caroliniana. Abhandl. des bot. Vereins der Prov. Brandenburg XXII, p. 58.

Abhängigkeit der Wurzelhaarbildung von äufseren Factoren.

Die Angaben von K. Persecke und E. Mer. — Abhängigkeit der Wurzelhaarbildung von der Feuchtigkeit. — Wachsthumsgeschwindigkeit der Wurzel bei verschiedener Feuchtigkeit. — Verschiedene Reaktionsfähigkeit der einzelnen Pflanzen. — Ausbildung des ganzen Wurzelsystems in feuchter und trockener Erde. — Maximum der Wurzelhaarbildung. — Unterdrückung der Haare durch mangelnde Feuchtigkeit. — Correlation zwischen Wachsthumsgeschwindigkeit und Behaarung. — Direkte Wirkung auf die Oberflächenzellen der Wurzel. — Analoge Wirkungen. — Widerstand des Bodens. — Nutation. — Reizwirkung von Bodentheilchen bei Elodea, bei Luftwurzeln. — Einfluss der vorhandenen Nährstoffmenge. — Licht und Schwerkraft. — Periodische Bildung von Haaren. — Beschränktes Auswachsen der Epidermiszellen der Wurzel. — Akropetale Anlegung der Wurzelhaare.

Aus dem Vorhergehenden ersehen wir, welche bedeutenden Vortheile der Pflanze durch eine ausgiebige Produktion von Wurzelhaaren geboten sind. Wenn deshalb den bei weitem zahlreichsten Gewächsen die Fähigkeit zukommt, Haare zu bilden, gibt es hingegen auch gewisse äußere Faktoren, welche eine Behaarung gänzlich oder theilweise hintanhalten können.

Wie bereits in unserer historischen Übersicht angedeutet wurde, haben sich R. Persecke und E. Mer mit den Ursachen dieser Erscheinung befasst, die dabei in Betracht kommenden Fragen jedoch nur in sehr unvollständiger Art und Weise gelöst.

Persecke [1]) legte dar, wie die Zahl der producirten Haare bei Steigerung der Feuchtigkeit abnimmt, ohne dass er auf eine nähere Untersuchung dieser einfachen Thatsache eingegangen wäre. Er gibt ferner an, dass einige Pflanzen in Wasser noch Haare bilden, wenn auch weniger als sonst, während andere in Wasser gänzlich unbehaart sind. Diese verschiedenartige Wirkung auf einzelne Pflanzen hat nichts besonders Auffälliges, da ja bei den Wasserpflanzen, die überhaupt noch zur Wurzelhaarbildung befähigt sind, sich die Zahl der vorhandenen Wurzelhaare als unabhängig von der Feuchtigkeit erweist.

Mer verfügt über eine größere Anzahl von Versuchen, aus denen er in seiner ersten Abhandlung [2]) den Schluss ziehen zu können glaubt, dass eine Hemmung im Längenwachsthum der Wurzel nothwendig sei, um die Wurzelhaarbildung zu steigern. Er stellt sich dies so vor, dass bei der Hemmung des Längenwachsthums der Wurzel die plastischen Stoffe in gleicher Weise nach der Wurzelspitze hingeschafft würden, wie sonst, und

---

1) Über die Formveränderung der Wurzel in Erde und Wasser. Leipzig, Diss. 1877.

2) Recherches expérimentals sur les conditions de développement des poils radicaux. Compt. rend. 1879. T. 88. p. 665ff.

da sie dann zur Verlängerung der Wurzel keine Verwendung fänden, zur Bildung von Wurzelhaaren den Anstoß geben müssten. Dies soll nun besonders in eklatanter Weise im feuchten Raume stattfinden. Mer vergisst dabei, dass eine Hemmung im feuchten Raume erst später bei einem Mangel an Wasser eintritt, während anfangs die Wurzel sehr schnell wächst und dennoch Haare bildet.

In seiner zweiten Abhandlung[1]) gibt Mer die Thatsache, dass die Wurzeln in Wasser am langsamsten wachsen, langsamer als in Erde und im feuchten Raume, ohne dass er daraus den natürlichen Schluss zieht, dass dann auch hier eine Ansammlung von plastischen Stoffen stattfinden müsse, die zur Wurzelhaarbildung führt. Demnach ist es keine eigentliche Aufklärung der Thatsachen, wenn Mer bei den Wurzeln einfach zwischen einem »facies terrestre« und einem »facies aquatique« unterscheidet. Diese Unterscheidung zwischen Land- und Wasserhabitus bezieht sich eigentlich mehr auf die Ausbildung des ganzen Wurzelsystems, worauf wir in unserer Abhandlung weniger Rücksicht zu nehmen haben.

Beide Autoren stimmen darin überein, dass sie eine zahlreiche Produktion von Haaren nur bei Verlangsamung des Wachsthums annehmen. Eine Ansicht, die mit den Thatsachen nicht übereinstimmt. Wenn ich eine in sehr trockener Erde gewachsene Wurzel mit einer in weniger trockenem Boden gewachsenen Wurzel vergleiche, werde ich bei letzterer allerdings auf den qmm Wurzeloberfläche eine geringere Anzahl von Haaren finden als bei der ersteren. Dafür ist die in feuchterem Medium erzogene Wurzel bedeutend länger geworden, so dass die absolute Zahl der producirten Haare hier größer ist als im anderen Falle.

Unter normalen Bedingungen, d. h. denjenigen Bedingungen, welchen die Wurzel angepasst ist, wird das Maximum der Wurzelhaarbildung mit dem Maximum der Wachsthumsenergie zusammenfallen. Die Wachsthumsenergie wird nun am größten sein bei dem günstigsten Verhältniss zwischen Luftzutritt und Feuchtigkeit, beim Optimum der Temperatur, einem Überschuss von Baumaterial und geringem Widerstand des Bodens. Jenachdem einer dieser verschiedenen Faktoren eine Hemmung des Wachsthums hervorgerufen hat, wird auch die Wirkung auf die Wurzelhaarbildung eine verschiedene sein. Ferner ist dabei zu berücksichtigen, dass das endliche Resultat sich nach der variirenden Reaktionsfähigkeit und Empfindlichkeit der einzelnen Pflanzen richtet.

Die am meisten auffallende Erscheinung ist die Abhängigkeit der Wurzelhaarbildung von der Feuchtigkeit und der damit verbundenen schwierigeren oder leichteren Aufnahme von Wasser durch die Pflanze.

Als unabhängig von der variirenden Feuchtigkeit sind

---

1) Compt. rend. 1879. T. 88. p. 1277.

von vorn herein jene Pflanzen auszunehmen, die sich constant unter Wasser befinden, wenn auch ihre Wurzeln in Schlamm oder Erde wachsen. Allerdings gibt es Pflanzen, deren Wurzeln im Wasser keine Haare bilden, während die Wurzeln im Contact mit dem Boden dicht behaart sind. Da ich später auf diesen Punkt zurückkommen werde, sei an dieser Stelle nur erwähnt, dass hier keineswegs ein durch den Boden ausgeübter Contactreiz wirksam ist, sondern dass hier ebenfalls nur eine Anpassungserscheinung an die schwierigere Wasseraufnahme vorliegt.

Die Wurzeln der Landpflanzen dagegen bedürfen zu ihrem Gedeihen außer der nöthigen Menge von Wasser auch noch eine reichliche Zufuhr von Luft. Wird dieselbe der Wurzel nur im gelösten Zustande mit dem Wasser zugeführt, wie dies bei einer Wassercultur oder in sehr feuchtem Erdboden stattfindet, so tritt eine Verlangsamung des Längenwachsthums der Wurzel ein und zugleich eine Hemmung der Wurzelhaarbildung.

Den experimentellen Nachweis, dass die Wurzeln im Wasser am langsamsten, langsamer als in mäßig feuchter Erde und im dampfgesättigten Raume wachsen, hat eigentlich schon Sachs[1]) geliefert. Ich modificirte seine Versuche in der Art, dass ich die Wurzeln, welche für den feuchten Raum bestimmt waren, in Kanälen wachsen ließ, welche in feuchte Sägespäne gestoßen waren. Ohne dass die Wurzeln mit den feuchten Sägespänen in Berührung kamen, trat hier keine solche Verminderung der Feuchtigkeit ein, welche das schließliche Aufhören des Wachsthums im dampfgesättigten Raume — wie Sachs angibt — zur Folge haben muss.

Versuch mit **Pisum sativum.**

Ich ließ die Wurzeln zuerst in feuchten Sägespänen ankeimen, brachte die möglichst gleichartigen in Wasser, resp. Erde oder dampfgesättigten Raum, wo sie zwei Tage verweilten, bevor sie zum ersten Male gemessen wurden. Nach 22 Stunden wurden sie zum zweiten Male gemessen. Ihr Zuwachs betrug in dieser Zeit:

A. in Wasser	B. in feuchter Erde	C. in feuchter Luft
11½	18	27½
10	24½	24½
7	18	14
11½	23½	30
12	22	27
9	24½	32
10½	22½	26½
	20½	27
Mittel **10.2** mm	Mittel **21.7** mm	Mittel **26.1** mm

Die in Wasser cultivirten Wurzeln zeigten keine Haare, während die Wurzeln von B und C dicht behaart waren.

1) Arbeiten des Würzb. Instituts. Bd. I. Heft 3. 1873. p. 410.

Bei dem einen Theil der Pflanzen wird durch zu große Feuchtigkeit die Wurzelhaarbildung gänzlich unterdrückt, während sie bei dem anderen Theil der Pflanzen nur geschwächt und vermindert wird. Es äußert sich hierin eben die verschiedene Reaktionsfähigkeit der einzelnen Pflanzen.

Man kann sich hiervon überzeugen, wenn man in ein und denselben Topf mit mäßig feuchter Erde Samen von Zea mais und Allium porrum legt. Die letztere Pflanze wird schon bei viel geringerer Feuchtigkeit die Wurzelhaarbildung einstellen als der Mais, der jedoch im Wasser ebenfalls haarlos bleibt.

Am wenigsten Feuchtigkeit scheinen die Zwiebelgewächse zu vertragen, da dieselben häufig schon zwischen constant feucht gehaltenem Fließpapier haarlos bleiben. Ich überzeugte mich hiervon an Muscari botryoides und Allium cepa.

Nach meinen Untersuchungen und den Angaben Persecke's[1]), die ich zumeist prüfte, bilden folgende Pflanzen im Wasser noch Haare:

Avena nuda	Fagopyrum esculentum
Avena sativa	Hordeum vulgare
Biscutella auriculata	Panicum miliaceum
Bromus secalinus	Setaria italica.
Brassica napus	

Die Haarbildung unterbleibt im Wasser bei:

Acorus calamus	Lupinus albus
Allium cepa	Lythrum salicaria
Allium porrum	Ornithopus sativus
Cicer arietinum	Pharbitis nil
Cicuta occidentalis	Phaseolus communis
Cicuta virosa	Phaseolus multiflorus
Cucurbita pepo	Pisum sativum
Helianthus annuus	Ricinus communis
Hyacinthus orientalis	Zea mais.

Zumeist habe ich die Keimlinge dieser Pflanzen untersucht. Die Wurzeln derselben verhalten sich jedoch gleich wie die Wurzeln der erwachsenen Pflanze. Die Haarbildung unterbleibt sowohl bei länger dauernden Wasserculturen, als auch bei sehr feuchter Witterung an den im freien Land wachsenden Pflanzen.

Die Folge des langsameren Wachsthums der Wurzel in Wasser und sehr feuchter Erde ist ferner, dass das ganze Wurzelsystem der Pflanze eine geringere Ausbildung erfährt. Die Pflanze sucht sich hierdurch den gegebenen Bedingungen anzupassen. Da bei größerer Feuchtigkeit die Aufnahme von Wasser und in Wasser gelösten Stoffen bedeutend

---

1) l. c. p. 19.

erleichtert sein muss, ist dem entsprechend sowohl an den Haaren, als an der Ausbildung des Wurzelsystems gespart.

Die verschiedene Empfindlichkeit der einzelnen Pflanzen macht sich hier ebenfalls geltend, was unser Versuch mit Tradescantia beweist. Die Ausbreitung des Wurzelsystems dieser Pflanzen wird durch die Feuchtigkeit nur wenig gestört.

Triticum vulgare.

Die Gesammtlänge der gebildeten Wurzeln betrug

1) In mit Wasser übersättigtem Boden:
   501, 601, 507, 682, 294, 207 mm.
   Für 1 Pflanze im Mittel **365** mm.
2) In mäßig feuchter Erde:
   539, 583, 755, 754, 694, 760, 795 mm.
   Für 1 Pflanze im Mittel **668** mm.
3) In trockner Erde:
   215, 410, 404, 347, 400, 345, 475 mm.
   Für 1 Pflanze im Mittel **371** mm.

Die Pflanzen in 1) sind fast gänzlich unbehaart, in 2) mäßig, in 3) dicht behaart.

Panicum miliaceum.

Die Gesammtlänge der gebildeten Wurzeln betrug

1) In mit Wasser übersättigtem Boden:
   47, 44, 51, 44, 50, 56, 53, 51 mm. Mittel **49.5** mm.
2) In mäßig feuchter Erde:
   80, 58, 65, 70, 76, 68, 63, 74, 65, 78 mm. Mittel **69.7** mm.
3) In trockner Erde:
   68, 63, 60, 74, 62, 59, 65, 66 mm. Mittel **64.6** mm.

Helianthus annuus.

Die Gesammtlänge von Haupt- und Nebenwurzeln betrug

1) In mit Wasser übersättigtem Boden:
   875, 694, 697 mm. Im Mittel **755** mm.
2) In mäßig feuchter Erde:
   1387, 1285, 1110, 1896 mm. Im Mittel **1419** mm.
3) In trockener Erde.
   824, 838, 1030, 710 mm. Im Mittel **867** mm.

Tradescantia erecta.

Die Gesammtlänge der gebildeten Wurzeln betrug

1) In Boden, der mit Wasser übersättigt war:
   131, 149, 128, 107 mm. Im Mittel **129** mm.

2) In Boden, der mäßig feucht erhalten wurde:
151, 155, 121, 130, 124 mm. Im Mittel **136** mm.

3) In etwas trockenerem Boden:
130, 132, 135, 149, 144 mm. Im Mittel **138** mm.

4) In wenig feuchtem Boden:
117, 115, 90, 80, 102 mm. Im Mittel **101** mm.

Wir haben gesehen, wie mit der Hemmung des Längenwachsthums der Wurzel durch große Feuchtigkeit eine bedeutende Reduktion der Haare verbunden ist. Durch zu geringe Feuchtigkeit dagegen wird ebenfalls das Längenwachsthum der Wurzel gehemmt, zugleich tritt jedoch scheinbar eine Vermehrung der Wurzelhaare ein. Meine weiter unten angeführten Versuche mit Mais- und Erbsenwurzeln beweisen, dass die Zahl der Wurzelhaare auf 1 qmm Wurzeloberfläche zwar zunimmt, dass dafür jedoch die Gesammtzahl der Haare zurückgeht. Dieses Zurückgehen der Wurzelhaarbildung kann nun unter bestimmten Bedingungen bis zur gänzlichen Unterdrückung der Wurzelhaarproduktion führen.

Es wird hierdurch die Anschauung begründet, dass es ein Minimum von Feuchtigkeit gibt, bei welchem die Wurzelhaarbildung beginnt, ein Optimum von Feuchtigkeit, wo sie ihren Höhepunkt erreicht, und ein Maximum, wo sie gänzlich oder theilweise unterdrückt wird.

Versuch mit **Pisum sativum.**

Ich ließ die Samen zuerst in feuchten Sägespänen ankeimen, bis die Wurzeln ungefähr 20—30 mm lang waren. Sodann wurden Wurzeln 15 mm unterhalb der Spitze mit einer Tuschmarke versehen und vorsichtig theils in sehr trockene, theils in minder trockene Erde eingesetzt. Um eine Abnahme von Feuchtigkeit zu verhindern, wurden die Versuchstöpfe im dampfgesättigten Raum gehalten. Die markirten Wurzeln waren selbstverständlich vor dem Versuche unbehaart. Die Zahl der Haare nach dem Wachsen in Erde wurde nach der p. 139 angegebenen Methode bestimmt.

	Länge des Zuwachses in mm	Länge der behaarten Wurzelstrecke in mm	Zahl der Haare darauf	Durchmesser der Wurzel in mm	Zahl der Haare auf 1 qmm	Mittlere Zahl der Haare auf 1 qmm
a) Trockene Erde	2	4.4	5 940	0.78	551	497
	6½	8.5	11 824	1.0	443	
b) Feuchtere Erde	48	46	24 610	0.87	213	240
	63½	49	32 928	0.8	267	

Der Zuwachs der Wurzeln betrug:
in trockener Erde 2, 3, 6, 3, 2, 2, 6½ mm. Im Mittel 3.5 mm,
in feuchterer Erde 48, 63½, 55, 61, 67 mm. Im Mittel 58.9 mm.

Versuch mit **Zea mais.**

Der Versuch wurde in derselben Art wie der vorige angestellt.

	Länge des Zuwachses in mm	Länge der behaarten Wurzelstrecke in mm	Zahl der Haare darauf	Durchmesser der Wurzel in mm	Zahl der Haare auf 1 qmm	Mittlere Zahl der Haare auf 1 qmm.
a) Trockene Erde	64	$59^1/_2$	32 784	1.0	175.5	241.4
	57	53	53 212	1.1	290.7	
	48	42	36 120	1.06	258.0	
b) Feuchtere Erde	93	86	46 010	1.15	148.1	208.3
	95	99	72 468	1.06	219.8	
	78	74	63 492	1.06	257.6	

Der Zuwachs der Wurzeln betrug:
in trockener Erde 57, 40, 69, 51, 56, 64, 48 mm. Im Mittel 55 mm.
in feuchterer Erde 93, 90, 76, 91, 88, 95, 78 mm. Im Mittel 87.3 mm.

Zur Überzeugung, dass bei einem gewissen Minimum an Feuchtigkeit zwar noch Wachsthum der Wurzel, aber keine Haarbildung mehr stattfindet, gelangte ich durch die Beobachtung von Luftwurzeln. Dieselben produciren in mäßig feuchter Luft keine Haare; sobald man sie jedoch in einen mit Wasserdampf erfüllten Raum leitet, bedeckt sich der ganze apikale Theil der Wurzel dicht mit Haaren, ebenso verhält es sich, wenn man die Wurzeln in Wasser oder in Erde wachsen lässt. Im feuchten Raum fällt jeder Contactreiz, durch welchen etwa Wurzelhaare hervorgerufen werden könnten, eo ipso fort. Im weiteren Verlaufe der Arbeit werden wir außerdem noch den Beweis finden, dass auch in den anderen hier angeführten Fällen von einem derartigen Reize nicht die Rede sein kann, dass also die vermehrte Feuchtigkeit allein die Haarbildung hervorgerufen hat.

Man kann sich von dem hier Angedeuteten nicht nur an den Luftwurzeln der Aroideen, sondern auch an den aus den Stengelknoten der Maispflanzen über der Erde entspringenden Wurzeln überzeugen. An Cereuswurzeln finden wir dasselbe.

Wenn es nun nicht gelingen will, z. B. Maiswurzeln, die in Erde gewachsen sind, durch Mangel an Feuchtigkeit wieder in Luftwurzeln ohne Haare überzuführen, so geschieht dies wohl hauptsächlich aus dem Grunde, weil hier die Anpassung an das feuchtere Medium schon zu weit gegangen ist, als dass sie einen plötzlichen Wechsel vertragen könnten. Es gelang mir dies jedoch mit Leichtigkeit an den Luftwurzeln von Philodendron dipinnatifidum. Dieselben wuchsen zuerst in Luft, wurden dann in Erde geleitet und bildeten hier Wurzelhaare. Als sie nun wieder aus der Erde heraus wuchsen und in die weniger feuchte Luft kamen, hörte auch die Wurzelhaarproduktion auf und die Wurzel nahm ihre frühere Beschaffenheit wieder an.

Durch die angeführten Thatsachen glaube ich die Abhängigkeit der Haarbildung von der Feuchtigkeit hinlänglich charakterisirt zu haben. Ich will daher nur noch kurz die Resultate meiner Untersuchung resumiren.

1) *Es gibt ein Minimum von Feuchtigkeit, bei welchem die Haarbildung beginnt, ein Optimum, wo sie ihren Höhepunkt erreicht, und ein Maximum, wo die Haarbildung gänzlich oder theilweise unterdrückt wird.*

2) *Die Unterdrückung der Wurzelhaarbildung bei großer Feuchtigkeit, also bei Erleichterung der Wasserzufuhr auf der einen Seite, die Beförderung der Wurzelhaarbildung bei erschwerter Wasseraufnahme auf der anderen Seite ist als eine Anpassungserscheinung an die verschiedenen äußeren Bedingungen aufzufassen. Letzteres ist mehr eine teleologische Erklärung der Thatsache, als eine Ergründung der Ursachen, weshalb wir an dieser Stelle nicht näher darauf einzugehen brauchen.*

3) *Bei dem Maximum der Wachsthumsgeschwindigkeit und unter den günstigsten Bedingungen bildet die Wurzel die zahlreichsten Haare. Eine Verlangsamung des Wachsthums durch zu große Feuchtigkeit läuft parallel mit der Reduktion der Haare, eine Verlangsamung des Wachsthums durch zu geringe Feuchtigkeit bedingt dagegen eine lokale Vermehrung der Haare, wenn auch die Gesammtmenge der Haare abnimmt.*

Wir ersehen aus der letzten Thatsache, dass von einer Correlation zwischen Wachsthumsgeschwindigkeit und Wurzelhaarbildung, als einem in erster Linie maßgebenden Faktor, in dem Sinne, dass durch Verlangsamung des Wachsthums die Produktion von Haaren hervorgerufen werde, nicht die Rede sein kann.

Wir sind im Stande, dies noch durch andere Thatsachen zu beweisen. Erstens kann man an Luftwurzeln von Aroideen durch lokale Berührung mit einem feuchten Körper eine lokale Haarbildung erzielen, ohne dass dabei eine Veränderung der Wachsthumsgeschwindigkeit der Wurzel stattfindet. Zweitens kann man eine im Wasser wachsende Wurzel durch sehr günstige Temperaturen dahin bringen, schneller zu wachsen, als eine in feuchter Erde befindliche Wurzel. Trotzdem wird letztere dicht mit Haaren besetzt sein, während die Haarbildung der ersteren vollständig unterdrückt ist.

Demnach müssen andere Ursachen als allein die Geschwindigkeit des Wachsthums sowohl für die Unterdrückung, als die Förderung der Haarproduktion maßgebend sein.

Das Wasser wirkt durch direkte Berührung auf die einzelnen Oberflächenzellen der Wurzel. Ebenso wirkt feuchte Luft durch direkten Contact, jedoch immer erst nach einiger Zeit der Einwirkung.

Am deutlichsten sehen wir den Unterschied, wenn wir eine im Wasser erzogene haarlose Mais- oder Erbsenwurzel nur mit der Spitze auf eine

Länge von 5—6 mm in Wasser tauchen, während der übrige Theil der Wurzel im feuchten Raum wächst. Unmittelbar über dem Wasser bilden sich zahlreiche Haare, während der in Wasser ragende Theil der Wurzel absolut haarlos bleibt.

Lässt man eine Wurzel zwischen zwei sehr feuchten Torfplatten wachsen, so wird die Haarbildung nur an jenen Stellen begünstigt, wo die Wurzel nicht mit dem feuchten Gegenstand, sondern mit der Luft in Berührung stand.

Da die Berührung mit Luft längere Zeit dauern muss, bevor ein Effekt erzielt wird, so kann man den fördernden Einfluss der Luftwirkung immer wieder durch den zeitweiligen Einfluss des Wassers aufheben.

So ließ ich Maiswurzeln abwechselnd in Wasser und in feuchter Luft wachsen, es fand jedoch erst nach längerem Aufenthalt (18 Stunden) der Wurzeln in Luft Haarbildung statt. Die Zahlen verstehen sich in Stunden:

feuchte Luft	—	$3^1/_3$	—	$2^1/_2$	—	2	—	2	—	3	—	$4^1/_2$	—	4	—	18
Wasser	$2^1/_4$	—	13	—	$2^1/_2$	—	16	—	$3^1/_2$	—	15	—	$53^3/_4$	—	4	—

Da die schwächste Haarbildung im Wasser, die stärkste in feuchter Luft stattfindet, konnte man daran denken, dass der Mangel an Sauerstoff allein die Ursache wäre, warum in Wasser die Menge der Haare so reducirt wurde. Dies ist jedoch nicht der wahre Grund, denn sonst müsste mit dem Einleiten von Sauerstoff in Wasser die Haarbildung beginnen. Ich will trotzdem nicht leugnen, dass es von einigem Einfluss ist, ob der Sauerstoff in gelöster Form oder anders der Pflanze dargeboten wird. Entscheidend ist dagegen der Einfluss des Sauerstoffs keineswegs. Ja bei längerem Zuleiten von Sauerstoff zu den in Wasser befindlichen Wurzeln wirkte derselbe sogar schädlich und rief eine Ablösung der äußersten Rindenschicht hervor.

Die beste Analogie des hemmenden Einflusses des Wassers ist uns durch die Einwirkung von concentrirten Salz- und Nährstofflösungen oder von gewissen Giften gegeben.

Wir wissen aus dem Vorhergehenden, dass z. B. die Wurzeln von Avena sativa oder Triticum vulgare im Wasser noch Haare bilden. Lassen wir diese Wurzeln nun in relativ concentrirten Salzlösungen wachsen, so hört die Haarbildung auf, bevor es zu einer Sistirung des Längenwachsthums der Wurzel kommt, das jedoch gleichfalls gehemmt wird.

Avena nuda.

15‰	Chlorcalciumlösung	keine Haare.
5‰	-	vereinzelte Haare.
0.5‰	-	sehr zahlreiche Haare.

Triticum vulgare.

15‰ Kalisalpeterlösung:
Die Wurzeln sind 6—10 mm lang geworden, tragen keine Haare.
2‰ Kalisalpeterlösung:
Die Wurzeln sind 40—60 mm lang geworden, tragen zahlreiche Haare.

Avena nuda.

Ebenso wie Chlorcalcium und Salpeterlösung wirken Nährstofflösungen.
10‰ Nährstofflösung:
Die Wurzeln sind 8—15 mm lang, tragen keine Haare.
1‰ Nährstofflösung:
Die Wurzeln sind bis zu 40 mm lang, tragen zahlreiche Haare.

In gleicher Weise wie diese concentrirten Lösungen wirkt das Einleiten von Kohlensäure oder noch besser eine Lösung von saurem kohlensauren Kalk. Hierbei wirkt der Kohlensäuregehalt direkt schädlich auf die Oberflächenzellen der Wurzel. Die Concentration der Lösung fällt nicht ins Gewicht.

Avena nuda.

	Maximal-Länge der Wurzeln	Mittlere Länge	Behaarung
1) Gesättigte Lösung von saurem kohlensauren Kalk	14 mm	10—11 mm	0
2) Die Lösung von 1) ist zur Hälfte mit destillirtem Wasser verdünnt	25 mm	15—20 mm	einzelne Höcker
3) 1/4 der Lösung von 1), 3/4 destillirtes Wasser	85 mm	50—60 mm	normal, Haare bis 2 mm lang

Derselbe Versuch wurde an Triticum vulgare mit demselben Resultat wiederholt.

Der Gehalt des gewöhnlichen Brunnenwassers an saurem kohlensauren Kalk und Kohlensäure mag der Grund sein, dass mehrere Pflanzen in destillirtem oder in Regenwasser mehr Wurzelhaare bilden, als in dem Brunnenwasser.

Es fragt sich nun, ob unter besonderen Bedingungen der schädliche Einfluss des Wassers aufgehoben werden kann. Äußere Faktoren sind hier nicht wirksam, wohl aber sind innere Ursachen, wie Nutation der Wurzel, im Stande, Haarbildung — selbst im Wasser — hervorzurufen. Dass letzteres durch die Steigerung der Wachsthumsenergie vermittelst optimaler Temperaturen nicht gelingt, haben wir schon oben kurz erwähnt. Es seien an dieser Stelle die beweisenden Versuchszahlen beigegeben.

Zea mais.

Die Wurzeln wachsen in Wasser.

a) Zuwachs der Wurzeln bei 10—11° C.
13, 8½, 12½, 10, 10 mm. Im Mittel **10.8** mm

b) Zuwachs der Wurzeln bei 27—28° C.
123, 128, 120, 110, 113, 118 mm. Im Mittel **118.6** mm.

Sämmtliche Wurzeln unbehaart.

Helianthus annuus.

Die Wurzeln wachsen in Wasser.

a) Zuwachs an den Hauptwurzeln bei 10—11° C.
12, 11, 17, 9, 13, 9 mm. Im Mittel **11.8** mm.

b) Zuwachs an den Hauptwurzeln bei 27—28° C.
22, 25, 50, 16, 62, 32, 24 mm. Im Mittel **37** mm.

Alle Wurzeln blieben unbehaart.

Dasselbe geschah, wenn man durch äußere Eingriffe, wie Ätzen oder Abschneiden der Wurzelspitze, die Hemmung, welche durch den Wassercontact hervorgerufen wurde, zu verstärken suchte.

Wiesner[1]) hat es bereits im Genaueren bewiesen, wie durch das Abschneiden oder Anätzen der Wurzelspitze die Wachsthumsenergie herabgemindert wird. Ich kann mich daher auf die Angabe nur einiger Versuche beschränken. Die Pflanzen wuchsen sämmtlich in Wasser und zeigten weder vor noch nach dem Versuche Haare.

Zea mais.

Die Wurzelspitze ist in einer Länge von 2 mm abgeschnitten.
Zuwachs der unbeschädigten Wurzeln 70, 45 mm.
Zuwachs der geköpften Wurzeln 1, 11½, 4, 2½, 4 mm.

Cicer arietinum.

Die Wurzelspitze wurde auf eine Länge von 10 mm abgeschnitten. Es gab diese starke Verletzung zwar den Anstoß zur Produktion von Nebenwurzeln, nicht aber von Wurzelhaaren.

Zea mais.

Ätzung der Wurzelspitze vermittelst salpetersauren Silbers.
Zuwachs der unverletzten Wurzeln 75, 55 mm.
Zuwachs der geätzten Wurzel 13, 14, 13 mm.
Bei den letzteren fand über der geätzten Stelle eine Anschwellung

1) Das Bewegungsvermögen der Pflanzen. 1881. p. 101 ff.

statt, der Durchmesser der einen Wurzel stieg z. B. von 1.18 mm auf 1.75 mm, und trotzdem wurde durch die Einwirkung des Wassers die Haarbildung verhindert.

Ferner versuchte ich es, das Wachsthum der Wurzeln durch bedeutende Widerstände zu hemmen, aber auch dann fehlten fast immer die Haare. Ich ließ Wurzeln von Mais oder von der Erbse auf ein enges Drahtgitter stoßen. Die Wurzeln bogen ab oder drängten sich durch das Gitter hindurch, Haare entstanden jedoch keine. Ferner ließ ich die Wurzeln der genannten Pflanzen in enge Glasröhren wachsen, die Hauptwurzel ging zumeist zu Grunde. Die Nebenwurzeln, welche abwärts zu wachsen bestrebt sind, drängen und biegen sich, ohne für gewöhnlich Haare zu bilden. Nur manchmal geschieht dies, was mir dann mehr durch eine Ansammlung von Nährstoffen und durch innere Ursachen bedingt erscheint.

Anders als diese äußeren Hemmungen wirkt eine Hemmung des Wachsthums durch Nutation.

Bei den im Boden wachsenden Pflanzen äußert sich die Wirkung der Nutation durch eine Häufung von Haaren, die manchmal auch eine Verdickung des Wurzeldurchmessers im Gefolge hat.

Ähnlich verhält es sich bei den Wurzeln, welche in Wasser noch Haare bilden. Es wird hier eine größere Anzahl von Haaren producirt, und die Haare werden bedeutend länger als sonst. So erreichten z. B. die Haare einer Wurzel von Avena sativa, welche sich mehrmals eingerollt hatte, eine Länge von 4.7 mm, während die Haare an normalen Wurzeln höchstens 2 mm lang werden. Wurzelhaarbildung fand an nutirenden Wurzeln auch noch in Lösungen statt von 10—15‰, wo nicht nutirende Wurzeln keine Haare mehr bildeten.

Bei den Pflanzen, welche für gewöhnlich in Wasser unbehaart sind, kann durch eine energischere Nutation, welche sich in einem Abbiegen der Wurzel kund gibt, Wurzelhaarbildung hervorgerufen werden. Dieselbe findet lokal an der Biegungsstelle statt. Wächst die Wurzel gerade weiter, so hört auch die Behaarung auf.

Ich überzeugte mich von dieser Thatsache an Wurzeln von Zea mais, Cicer arietinum, Pisum sativum, wo immer bei einer stärkeren Nutation Wurzelhaarbildung eintrat.

Manchmal ist die Nutation weniger deutlich ausgesprochen, indem sich nur eine geringe Biegung bemerkbar macht; dafür sieht man jedoch an der Verdickung der Wurzel, dass eine Hemmung des Wachsthums stattgefunden hat. Die verdickte Stelle ist dann meistens mit Wurzelhaaren bedeckt. Ich konstatirte dies bei einer Wasserkultur von Zea mais in einer Nährstofflösung von $^1/_2$ pro mille. Die Erscheinung war besonders an den Nebenwurzeln deutlich zu sehen. Da alle Übergänge vom vollständigen Abbiegen der Wurzel bis zum Geradebleiben derselben vorhanden waren,

glaube ich, dass diese Verdickungen auf dieselben Ursachen zurückzuführen sind wie die Nutation.

Zea mais. Durchmesser der Wurzeln.

Vor der behaarten Stelle	Behaarte Stelle	Nach der behaarten Stelle
0.55	0.6—0.65	0.54
0.72	0.78—0.82	0.58
0.49	0.58	0.46
0.39	0.53	0.36

Künstliche Beugung hat nicht dasselbe Resultat wie Nutation. Wir sehen dies, wenn wir Wurzeln, die in Wasser wachsen, auf den Boden des Gefäßes stoßen lassen, wobei niemals Behaarung eintritt.

Zur besseren Übersicht fasse ich kurz die im letzten Abschnitt meiner Arbeit gewonnenen Resultate zusammen:

1) *Das Wasser und die feuchte Luft wirken direkt auf die Oberflächenzellen der Wurzeln.*

2) *Der Mangel an Sauerstoff ist nicht die Ursache des Ausbleibens der Wurzelhaare in Wasser.*

3) *Der schädliche Einfluss des Wassers kann weder durch weitgehende Hemmung, noch durch bedeutende Beschleunigung der Wachsthumsgeschwindigkeit aufgehoben werden. Ebensowenig geschieht dies durch Hemmungen, welche von äußeren Faktoren herrühren. Besonders wichtig ist, dass der Widerstand des Bodens oder eines anderen Gegenstandes, welcher der Wurzel entgegentritt, niemals zur Wurzelhaarbildung Veranlassung gibt.*

4) *Nutation der Wurzel befördert die Produktion von Haaren.*

Nach diesen Ergebnissen wäre es noch möglich gewesen, dass die Berührung mit Bodentheilchen wie ein Reiz wirken könnte, und dass in gewissen Fällen ein derartiger Reiz zur Wurzelhaarbildung führen würde.

Für die Wurzeln von Landpflanzen war dies von vornherein nicht anzunehmen, da die Haarbildung ja unterbleibt, sobald die Feuchtigkeit eine gewisse Grenze überschreitet, ob nun dieser Contact mit dem Boden besteht, oder ob die Wurzel in Wasser wächst. Ferner tritt in feuchter Luft sehr dichte Behaarung ein, wo jeder Contact mit festen Körpern fehlt, die als Reiz wirken könnten.

Anders lag die Sache bei den Wurzeln von Elodea canadensis und Nuphar luteum einerseits, bei den Luftwurzeln von Aroideen und Orchideen andererseits.

Die Wurzeln von Elodea und Nuphar bilden nämlich im Wasser niemals Haare, und erst wenn sie in Erde oder Schlamm wachsen, beginnt die Haarproduktion.

Ließ ich Elodeawurzeln zwischen Glasperlen oder Glasscherben wachsen, so war in dem einen Fall ein Contact mit einem festen runden Körper, im anderen Fall mit einem scharfkantigen Körper gegeben, die jedoch beide keine Haarproduktion hervorriefen. Die scharfen Kanten des Glases bewirkten sogar eine lokale Bräunung der Oberfläche, aber nichts weiter. Es war möglich, dass der Widerstand des Bodens eine Hemmung hervorgerufen hätte, die zur Wurzelhaarbildung führte; aber auch dies fand nicht statt. Ich überzeugte mich hievon dadurch, dass ich Elodeawurzeln in fest gestampften Sägespänen wachsen ließ, die einen ziemlich bedeutenden Widerstand boten; aber auch hier unterblieb die Behaarung.

Ein chemischer Reiz, den die im Boden vorhandenen Nährsalze vielleicht ausüben konnten, ist auch ausgeschlossen, indem die Wurzelhaare auch in Sandboden erscheinen, der lange Zeit mit Salzsäure und Wasser ausgelaugt war. Nach Ausschluss all dieser Möglichkeiten muss ich gestehen, dass ich die besprochene Thatsache nicht zu erklären vermag.

Was nun die Luftwurzeln anbelangt, so habe ich speciell mit Philodendron dipinnatifidum Versuche darüber angestellt, ob ein Contactreiz Wurzelhaarbildung hervorrufe oder nicht. [1]) Ich glaubte dies verneinen zu können, da die Wurzeln sowohl in feuchter Luft, als in Wasser Haare bilden. Ich ließ dieselben nun in trockenem Sand wachsen, und fand zu meinem Erstaunen die Wurzeln ziemlich dicht mit Haaren besetzt.

Es stellte sich jedoch heraus, dass der Sand nicht ganz trocken war, wenigstens um die Wurzeln herum. Durch ausdünstendes Wasser hatten die Wurzeln eine feuchte Atmosphäre um sich geschaffen, die dann wieder eine Haarproduktion zur Folge hatte.

Ich modificirte den Versuch nun in folgender Weise. Ich umgab die jüngeren Theile der Wurzel mit einer nicht eng anschließenden Papierhülse. Zwischen Papier und Wurzel befand sich geglühter trockener Sand. Die ganze so umhüllte Wurzel wurde in ein Gefäß geleitet, an dessen Boden sich Chlorcalcium befand, um alle ausdünstende Feuchtigkeit aufzusaugen und somit die Sandschicht trocken zu erhalten. Auf diese Art gelang es jede Haarbildung hintanzuhalten, während die Wurzel nach Beseitigung des Chlorcalciums sich mit Haaren bedeckte.

Es ist bloß ein sehr geringer Grad von Feuchtigkeit zur Produktion von Haaren nothwendig, weshalb die gegebenen Erscheinungen leicht zu Täuschungen Veranlassung geben. Ein Contactreiz durch feste trockene Körper wird nicht ausgeübt.

Als letzter Faktor, welcher das Wurzelwachsthum beeinflusst, ist die Menge der vorhandenen Nährstoffe zu erwähnen. Die Wurzel kann sich anders verhalten, ob ihr bloß das zu langsamem Wachsthum ge-

---

1 Vgl. die Angaben von H. Mohl, Ranken und Schlingpflanzen. 1827. p. 49 und Chatin, Bot. Zeitg. 1858. p. 133. Außerdem Pfeffer, Pflanzenphysiologie. II. 1881. p. 152.

rade ausreichende Baumaterial zu Gebote steht, oder ob sie über einen Überschuss von Nährstoffen zu verfügen hat.

Diese Voraussetzung wurde durch die Thatsachen bestätigt. Bei einem Überschuss von Nährstoffen sind viele Pflanzen im Stande, den der Wurzelhaarbildung schädlichen Einfluss des Wassers zu überwinden. Ein Beispiel dafür bieten uns die Keimlinge jener Pflanzen, deren Wurzeln im Wasser noch Haare produciren. Die hier vorhandenen Reservenährstoffe bieten einen Nahrungsvorrath, welcher der Pflanze die Produktion von Haaren ermöglicht. Nimmt nun die Menge dieser Reservestoffe ab, ohne dass die Pflanze selbst den nöthigen Nahrungsüberschuss beschaffen kann, hört zuerst die Produktion der Haare auf, während das Längenwachsthum der Wurzeln noch fortdauert. Der Übergang ist kein plötzlicher, sondern das Abnehmen erfolgt allmählich. Natürlich kommt es dabei wesentlich auf die Größe des Samens an, bei welchem Stadium des Wachsthums die Haarbildung aufhört.

Avena sativa bildete im Dunkeln auf Wasser 4—5 Wurzeln, die 11—14 cm lang werden, bevor sie zu wachsen aufhören, doch die letzten 2—3 cm tragen nur sehr wenige Haare.

Ebenso verhielt es sich mit Wurzeln von Triticum vulgare, die höchstens 15 cm lang wurden, und an denen ebenfalls die Haarmenge 3—4 cm vor der Wurzelspitze aufhörte.

Wählen wir kleinere Samen, wie von Brassica napus, Aster chinensis, Beta orientalis, Vesicaria sinuata, erhalten wir dasselbe Resultat, nur dass hier die Wurzelhaare höchstens auf eine Strecke von 2 cm hin gebildet werden, während der übrige 2—3 cm lange Wurzeltheil unbehaart bleibt. Die Wurzelhaare sind überall an der Basis der Wurzel am längsten und nehmen später an Zahl und Größe ab.

Ist der Überschuss an Nährmaterial kein bedeutender, so kann durch die Steigerung der Wachsthumsgeschwindigkeit der Verbrauch an Baumaterial ebenfalls so gesteigert werden, dass die Haarbildung in Folge dessen aufhört.

Versuch mit **Setaria italica.**

Ich ließ Samen auf Wasser schwimmend 2 Tage keimen, bis ihre Wurzeln eben aus der Samenschale hervortraten. Am 15. Februar wurden die einen in einen Kasten gestellt, dessen Temperatur konstant auf 25—26° C. gehalten wurde, die anderen in einen Kasten von 14—15° C.

Am 17. Februar waren die Wurzeln bei 25—26° C. im Durchschnitt 18.8 mm lang (Mittel aus 21 Messungen) geworden, während die anderen nur eine Länge von 4.9 mm (Mittel aus 25 Messungen) erreicht hatten, die letzteren Pflanzen trugen kurze Haare, diejenigen im Wärmekasten waren haarlos. Am 20. Februar ergab sich bei der Messung der Wurzeln, dass dieselben im Wärmekasten nur noch wenig gewachsen waren, sie erreich-

ten im Mittel 22.1 mm, während sich die anderen Wurzeln im Durchschnitt auf 12.6 mm verlängert hatten. Bei der niedrigeren Temperatur und dem langsameren Wachsen waren hier noch nicht so viele Nährstoffe verbraucht und das Wachsthum konnte länger andauern. Doch hörten schließlich auch diese Wurzeln auf Haare zu bilden.

Ein Versuch mit Panicum miliaceum, unter den gleichen Bedingungen angestellt, bestätigte das zuerst gewonnene Resultat.

Ich habe absichtlich hervorgehoben, dass ohne Nährstoffmangel der schädliche Einfluss der Wasserwirkung aufgehoben wird, denn jene Wurzeln, die wegen Nährstoffmangel aufgehört hatten Haare zu bilden, können sich in feuchter Luft an ihren jüngeren Theilen noch mit Haaren bedecken, wenn dieselben auch nicht in sehr großer Anzahl erscheinen. Die Berührung mit Luft bietet eben dem Auswachsen der Oberhautzellen der Wurzeln kein Hinderniss, wie dies durch die Berührung mit Wasser geschieht.

Befindet sich also die Wurzel unter den für die Haarbildung günstigen Bedingungen, so erlischt bei Mangel an Nährstoffen das Längenwachsthum der Wurzel zu gleicher Zeit mit der Produktion von Haaren. Im anderen Falle hört die Bildung von Haaren früher auf als das Längenwachsthum.

Von äußeren Einflüssen ließ ich bisher unberücksichtigt die Einwirkung von Licht und Schwerkraft. Hiebei kann ich mich kurz fassen. Sie sind beide wirkungslos auf die Behaarung der Wurzeln von Landpflanzen.

Beim Licht konnte man eher noch einen Einfluss erwarten, nach der Analogie mit den Farnprothallien, wo nach Leitgeb die Anlage der Rhizoiden immer auf der Schattenseite erfolgt.

Ich stellte Versuche an mit Wurzeln, die in Wasser Haare bilden, und mit Wurzeln, die keine bilden. In beiden Fällen erlitten die Behaarungsverhältnisse keine merkliche Änderung.

Persecke behauptet, dass die Oberhautzellen einer normal nach abwärts gerichteten Wurzel immer an der Seite zu Haaren auswachsen, welche der Wurzelspitze zugekehrt ist. Ich konnte dies nicht bestätigen. Das Auswachsen zu Haaren kann an allen Stellen erfolgen. Eine Schwerkraftswirkung liegt daher nicht vor. Ebensowenig zeigt weder die Oberseite noch die Unterseite einer horizontal gelegten Wurzel eine Vermehrung oder Verminderung der Wurzelhaarbildung, die durch die Schwerkraft hervorgerufen sein könnte.

Da die im Freien gewachsenen Pflanzen selten gleichmäßig mit Wurzelhaaren bedeckt sind, sondern für gewöhnlich dichter behaarte Strecken mit haarlosen oder doch weniger behaarten Stellen abwechseln, konnte man an eine periodische Bildung der Wurzelhaare denken, die als eine ererbte Eigenschaft der Wurzel inhärent sei. Eine solche Periodi-

cität ist nicht vorhanden, denn eine Pflanze, die in gleichmäßig feucht gehaltener, nicht zu stark begossener Erde wächst, zeigt eine vollständig gleichmäßige Vertheilung der Haare über die ganze Länge der Wurzel, sobald man nur durch günstige Kulturbedingungen für eine reichliche Nahrungszufuhr sorgt. Eine Ausnahme machen die nur bei der Keimungsperiode auftretenden Haarbüschel.

Noch besser überzeugt man sich von der Continuität der Wurzelhaarbildung an jenen Pflanzen, welche im Wasser noch Haare bilden. Kulturen von Avena sativa und Bromus secalinus sind zu jenen Versuchen sehr geeignet.

Da also die Möglichkeit einer Periodicität ausgeschlossen ist, bleibt nur noch die Annahme übrig, dass die Oberhautzellen der Wurzel nach verhältnissmäßig kurzer Zeit die Fähigkeit verlieren, überhaupt zu Haaren auszuwachsen. Diese Annahme wurde durch meine Versuche bestätigt.

Junge Keimpflanzen von Zea mais, deren Wurzeln in Wasser keine Haare gebildet hatten, wurden in der Länge von 1 cm mittelst Tuschmarken in Zonen von je 1 mm Länge getheilt. Bevor sie nun in den feuchten Raum kamen, legte ich sie ungefähr 10—15 Minuten lang in Wasser, damit ein während des Markirens etwa eingetretener Wasserverlust ersetzt würde. Nach 24 Stunden wurden die Wurzeln wieder beobachtet, wobei sich herausstellte, dass die basalen Theile der Wurzel haarlos geblieben waren, und die Haare in den einzelnen Pflanzen nur bis zur 8. oder 9. Millimeterzone hinaufreichten. Oft ging die Behaarung nicht einmal so weit.

Dasselbe Resultat erhielt ich an Wurzeln von Pisum sativum. Ich modificirte den Versuch, indem ich die Spitzen der Wurzeln auf eine Länge von 3 mm in Wasser tauchen ließ, um einem etwaigen Mangel an Feuchtigkeit vorzubeugen. Trotzdem ging die Wurzelhaarbildung nur bis zur 10. oder 11. Millimeterzone.

Taucht man die Wurzelspitze weiter ein, etwa 13—15 mm, während sich der übrige Theil der Wurzel im feuchten Raume befindet, bilden sich über der Wasserfläche keine Haare mehr. Zu derartigen Versuchen dienten mir ebenfalls die Wurzeln von Erbsen- und Maiskeimlingen. Die Entfernung, bis zu welcher die Oberflächenzellen der Wurzeln noch zum Auswachsen fähig bleiben, ist nicht konstant, indem bei sehr schnell wachsenden Wurzeln, z. B. in feuchten Sägespänen, die ersten Haare erst weiter hinter der Wurzelspitze anfangen, somit die Wurzelhaarbildung länger andauert. Dabei ist natürlich die Constanz der günstigen Wachsthumsbedingungen vorausgesetzt.

Ist die Wurzelhaarbildung bis zu einer gewissen Zone vorgeschritten, und sind unter den herrschenden Bedingungen vielleicht nur wenig Haare gebildet, so sind die andern Oberflächenzellen jener Zone nicht mehr fähig auszuwachsen, selbst wenn die Wurzel unter günstigeren Bedingungen

weiter wachsen würde. Mit anderen Worten, die Anlegung der Wurzelhaare erfolgt in akropetaler Reihenfolge, und zwischen schon gebildeten Haaren werden niemals neue Haare interkalar eingeschoben.

Ich entschied dies durch einen Versuch mit Tradescantia erecta. Diese Pflanze bildet in Wasser Wurzelhaare, umsomehr also auch in feuchter Luft. Verwendet man nun statt Wasser eine $^1/_2$procentige Nährstofflösung, nehmen, wie wir später sehen werden, die Wurzelhaare ganz eigenthümliche kurze dicke Formen an. Nach dem Übertragen derartiger Wurzeln in einen möglichst dampfgesättigten Raum, erkennt man die neu gebildeten Haare sogleich an der schlanken, schmalen Form, während die älteren Haare unverändert geblieben sind. Zwischen den früher angelegten Haaren oder unterhalb derselben befinden sich keine Haare, welche jenen im feuchten Raume gewachsenen ähnlich wären.

Durch die in diesem Abschnitt gegebenen Thatsachen glaube ich hinlänglich gezeigt zu haben, welche Faktoren bei der Unterdrückung und Bildung der Wurzelhaare maßgebend sind, und auf welche Weise die unbehaarten Wurzeltheile zu Stande kommen.

Das Vorkommen der Wurzelhaare.

Allgemeines. — Bedingungen, unter denen einer Pflanze die Fähigkeit, Haare zu bilden, verloren gegangen sein kann. — Sumpf- und Wasserpflanzen. — Theilweise und gänzliche Reduktion der Haare. — Unterdrückung der Haarbildung bei Verminderung des Bedarfs an Wasser etc. — Coniferen und Cupressineen. — Crassulaceen etc., Knollengewächse. — Schmarotzerpflanzen. — Häufung von Wurzelhaaren zu bestimmten Zwecken. — Bildung von Wurzelhaaren an Stengel- und Blattorganen. — Tabelle der untersuchten Familien.

Nach meinen Untersuchungen, welche eine ziemlich bedeutende Anzahl der verschiedensten Pflanzen umfassen, sind die Wurzelhaare bei den allermeisten Gewächsen vorhanden. Wenn daher einer Pflanze die Fähigkeit fehlt, Wurzelhaare zu produciren, ist dies eine Ausnahme von der Regel. Wir treffen diese Ausnahme nicht etwa nur bei gewissen Familien, sondern vielmehr bei Gruppen von Pflanzen, die weniger durch Verwandtschaft, als durch gemeinsame Lebensweise und Bedürfnisse mit einander verbunden sind.

Fassen wir zunächst diese Ausnahmen ins Auge. Schon im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, wie die einzelne, Wurzelhaare producirende Pflanze sich verschiedenen äußeren Bedingungen anpassen kann, indem

sie bei Erleichterung von Wasserzufuhr sowohl die Ausdehnung ihres Wurzelsystems vermindert, als eine Reduktion der Haare eintreten lässt. Nehmen wir nun solche Pflanzen, welche sich konstant unter den eben besprochenen Bedingungen befinden, so ist es denkbar, dass nach und nach die betreffende Pflanzenspecies immer weniger Haare producirt, bis sie schließlich sogar die Fähigkeit, Wurzelhaare hervorzubringen, ganz verlieren kann, da dies für sie überflüssige Organe sind.

Zwei verschiedene Bedingungen sind denkbar, unter denen die Wurzelhaarbildung überflüssig wird:

Erstens: Die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen wird sehr erleichtert bei mehr weniger großem Verbrauch. Dies findet statt bei Wasser- und Sumpfpflanzen.

Zweitens: Der Verbrauch und Bedarf an Wasser und Nährstoffen ist ein geringerer, ohne dass eine besondere Erschwerung der Aufnahme damit in Zusammenhang steht. Dies trifft zu bei Nadelhölzern, Knollengewächsen und zum Theil auch bei Schmarotzern.

Um die erste der eben gegebenen Möglichkeiten richtig zu beurtheilen, müssen wir uns vergegenwärtigen, dass der Hauptzweck der Wurzelhaare in einer Vergrößerung der aufsaugenden Fläche besteht. Unter sonst gleichen Bedingungen wird im Allgemeinen die Menge der aufgenommenen flüssigen Nahrung proportional mit der Oberfläche steigen. Hiezu kommt nun als zweiter Faktor: die Menge des aufgenommenen Wassers wird bei gleicher Oberfläche um so größer sein, je leichter die Aufnahme geschehen kann, d. h. je mehr Wasser u. s. w. der Pflanze dargeboten wird.

Letzteres trifft nun bei Sumpf- und Wasserpflanzen zu, weshalb wir es begreiflich finden, dass dieselben ihre Wurzelfläche verringern können, ohne dadurch Schaden zu leiden. Die Zahl solcher Pflanzen, welche nur wenig oder gar keine Wurzelhaare produciren, ist verhältnissmäßig groß. Dazu kommt noch, dass bei den unter Wasser befindlichen Pflanzentheilen die Aufnahme von Stoffen auch noch durch Blatt- oder Stengelorgane vermittelt werden kann, während zugleich der Transpirationsverlust hinwegfällt.

Die Reduktion der Wurzelhaare findet nicht bei allen Wasserpflanzen in demselben Maße statt.

Eigentliche Sumpfpflanzen, die eventuell auch auf einem zeitweise weniger nassen Boden zu leben gezwungen sind, zeigen uns stellenweise noch ziemlich zahlreiche Wurzelhaare; so z. B. Scirpus silvaticus, Carex paludosa.

Bei anderen Sumpfpflanzen trifft die Reduktion der Wurzelhaare besonders die Hauptwurzel, während die Nebenwurzeln noch ziemlich stark behaart sind. Als Beispiel führe ich Heleocharis palustris und Trianea bogotensis an. Der Hauptwurzel kommt hier eigentlich mehr die Funktion

zu, der Pflanze den ersten Halt im Boden oder Schlamme zu gewähren, als die Pflanze hervorragend mit Nährstoffen zu versorgen. Etwas Analoges fand ich bei Sagittaria sagittaefolia, wo die stärkeren Wurzeln unbehaart blieben, während die gleichzeitig erscheinenden dünneren Wurzeln Haare besaßen. Bei den bisher genannten Pflanzen waren an vereinzelten Stellen der Wurzel noch zahlreiche Haare vorhanden.

Bei weitergehender Reduktion finden wir an dem ganzen Wurzelsystem der Pflanze nur noch sehr vereinzelte Haare. Bei Nuphar luteum, Vallisneria spiralis, Eriophorum angustifolium u. a. kann man häufig 4—5 Wurzeln untersuchen, bevor man nur überhaupt Haare findet.

Hier anzuschließen ist jene schon im vorigen Abschnitt erwähnte Gruppe von Pflanzen, denen die Wurzelhaare im Wasser vollständig fehlen, während sie zahlreich erscheinen, sobald die Wurzel in Erde dringt. Ein eklatantes Beispiel bietet Elodea canadensis, der sich nach der Angabe Persecke's [1]) Acorus Calamus und Cicuta virosa anreiht. Eine analoge Thatsache gibt Leitgeb [2]) für Riccia natans (Ricciocarpus natans Leitg.) an, wo Rhizoiden sich nur bei der Kultur auf Erde vorfinden, während sie in Wasser vollständig fehlen.

Zum Schluss sind noch jene Pflanzen aufzuzählen, bei denen die Wurzelhaare überhaupt fehlen, und die weder in Wasser noch in Erde oder im feuchten Raume Haare bilden, wovon ich mich durch verschiedene Versuche überzeugt habe.

Hieher gehören:

Butomus umbellatus.
Caltha palustris.
Euryale ferox.
Hippuris vulgaris.
Lemna minor.
— trisulca.
Limnanthemum nymphaeoides.
Menianthes trifoliata.
Myriophyllum spicatum.
Nymphaea alba.
Pistia stratiotes.
Udora occidentalis. [3])
Victoria regia. [3])

Wir kommen nun zu der zweiten Kategorie von Pflanzen, bei denen die Wurzelhaarbildung verringert ist, weil der Verbrauch hauptsächlich an Wasser durch die Beschaffenheit der Pflanze vermindert wird. Wir finden besonders bei Coniferen und Cupressineen die Blätter mit einer Epidermis versehen, deren Außenwände sehr stark verdickt sind. Die Folge davon ist, dass die Blätter dieser Pflanzen weniger leicht welken, die Pflanze also bei ihrer Transpiration geringere Quantitäten von Wasser verbraucht als andere Pflanzen mit leicht welkenden Blättern. Da diese Pflanzen zumeist ein gut ausgebildetes Wurzelsystem besitzen, genügt die Oberfläche der Wurzeln, sowohl um den Transpirationsverlust zu decken,

1) Über die Formveränderung der Wurzel in Erde und Wasser. 1877. p. 38.
2) Untersuchungen über die Lebermoose. Bd. IV.
3) Nach R. Caspari, in: Jahrb. f. wiss. Bot. 1858. Bd. I. p. 395.

als die nöthigen Nährstoffe aus dem Boden aufzunehmen. Der hieraus resultirende Mangel an Haaren trifft nicht allein Coniferen und Cupressineen, sondern findet sich auch bei Agaven und Palmen wieder.

Unter allen den von mir untersuchten Abies- und Pinusarten besaß nur Abies abovata manchmal ganz kurze Haare (bis zu 0.15 mm lang), die schon vermöge ihrer Kleinheit und ihrer geringen Anzahl für die Wasseraufnahme von keiner hohen Bedeutung sein konnten.

Die Wurzelhaare fehlten dagegen bei:

Abies excelsa.	Biota orientalis.
— canadensis.	Thuya occidentalis.
— Douglasii.	Cryptomeria japonica.
— nigra.	Cupressus Lindleyi.
Pinus Sabiniana.	———
— Jeffreyi.	Agave americana.
— silvestris.	Phoenix dactylifera.
— Pinaster.	

Nicht allen Pflanzen mit solch lederartigen Blättern mangeln die Haare, so hat z. B. Taxus baccata ziemlich zahlreiche Wurzelhaare, ebenso Buxus sempervirens, wenn dieselben hier auch seltener sind. Die Wurzeln von Salisburia adiantifolia sind ähnlich gebaut wie die Coniferenwurzeln, doch entspricht der größeren Blattfläche auch eine dichte Behaarung der Wurzel. Wir sehen schon hieraus, dass nicht allgemein dem geringeren Verbrauch auch eine vollständige Reduktion der Haare entspricht. Es beweisen uns dies insbesondere die Crassulaceen und Cactusgewächse. Ich untersuchte Sedum- und Sempervivumarten, Opuntia und Cereus, aber überall fand ich eine dichte Behaarung. Der Grund davon liegt jedenfalls darin, dass die Aufnahme des Wassers aus dem sehr trockenen Substrat dieser Pflanzen eine stärkere Behaarung der Wurzel verlangt, wenn auch die Pflanze durch Verdunstung weniger verliert.

Eine weitere Gruppe von Pflanzen, die hier zu nennen sind, bilden die zu den Liliaceen gehörenden Knollen- resp. Zwiebelgewächse. Denselben wurden von verschiedenen Autoren Wurzelhaare überhaupt abgesprochen. Sie sind jedoch fast alle befähigt, Haare zu produciren, wenn die Haarbildung zeitweise auch gänzlich unterbleiben kann. Es werden nämlich zumeist erst an den später entstehenden Wurzeln Haare producirt, was mit der Wachsthumsweise dieser Pflanzen zusammenhängt. Dieselben legen gemäß den Untersuchungen Resa's[1]) die Wurzeln für das nächste Jahr schon im Sommer des vorhergehenden Jahres an und bilden dieselben im Herbst weiter aus. Nachdem für den Winter eine Ruheperiode eingetreten ist, verfügen sie doch im Frühjahre, wenn die oberirdischen Theile zu wachsen beginnen, schon über ein ganz ansehnliches Wurzelsystem, das die Aufnahme der flüssigen Nahrung wesentlich erleichtert.

1) Fr. Resa, Über die Periode der Wurzelbildung. Diss. Bonn 1877.

Die Wurzeln wachsen also anfangs zu einer Zeit, wo der Verbrauch der oberirdischen Theile an flüssiger Nahrung fast Null ist, und hiemit in Correlation steht das Fehlen der Behaarung. Ist nun im Frühjahre für die Entfaltung und Entwickelung der oberirdischen Theile eine größere Aufnahmsoberfläche nothwendig, treten die Wurzelhaare hinzu.

Sehr leicht sind diese Thatsachen z. B. bei Allium fistulosum zu beobachten, deren dicke Primärwurzeln nur wenig behaart sind, während die später und erst in einiger Tiefe auftretenden Nebenwurzeln zahlreiche Haare tragen. Daher erklären sich auch die widersprechenden Angaben einiger Autoren über das Vorhandensein von Wurzelhaaren an Hyacinthen.

Fehlen die Wurzelhaare auch nicht gänzlich, so bleiben sie doch häufig sehr kurz und in geringer Zahl; so bei verschiedenen Alliumarten, bei Convallaria latifolia und polygonatum, Muscari monstrosum, Ranunculus repens und Anderen.

Ist der oberirdische Theil der Pflanze im Verhältnisse zu dem ausgebildeten Wurzelsysteme gering, kann die Wurzelhaarbildung auch ganz unterbleiben. Auf diese Art hat Crocus sativus vollständig die Fähigkeit, Wurzelhaare zu bilden, verloren. Ebenso genügt bei Tulipa Gesneriana das vorhandene Wurzelsystem zur Entwickelung der Pflanze, ohne dass Wurzelhaare nothwendig wären.

Im Anschluss an diese Pflanzen sind noch einige Schmarotzergewächse zu nennen, denen Wurzelhaare ebenfalls fehlen. Vergleichen wir die auf Humusboden oder fremde Wurzeln angewiesenen Pflanzen, finden wir, dass, so lange die Pflanze noch fähig ist, theilweise selbständig zu assimiliren, und mit ausgebildeten Blättern versehen ist, sie auch noch Wurzelhaare producirt. Wir finden daher die Wurzeln von Euphrasia, Melampyrum, Goodyera, Thesium noch mit Haaren besetzt.

Eine Ausnahme macht der auf Graswurzeln schmarotzende Rhinanthus minor. Das vorhandene Wurzelsystem ist hier im Stande, auch ohne Haare die für die Pflanze nothwendige Nahrung aus dem Boden zu beschaffen, wobei allerdings die den fremden Wurzeln vermittelst der Haustorien entzogenen Stoffe mit in Betracht kommen mögen.

Die Haare fehlen, sobald die Pflanze fast ausschließlich nur von den aus dem Humusboden aufgenommenen Substanzen lebt.

Hieher gehören:

Monotropa hypopitys.
Neottia nidus avis.[1])
Orobanche ramosa.

Ich vermuthe, dass dieses Fehlen der Haare durch das Zusammenwirken verschiedener Faktoren hervorgerufen wird. Die genannten Pflanzen haben keine besonders großen Blattflächen, wachsen sehr langsam, leben

1) Vgl. Drude, Die Biologie von Monotropa hypopitys und Neottia nidus avis. Göttingen 1873. p. 11.

häufig in feuchtem Boden, und schließlich ist vielleicht auch die Art der Nährstoffaufnahme maßgebend. Bei der wenig sicheren Kenntniss der letzteren will ich mich weiterer Hypothesen enthalten, und nur die Thatsachen konstatiren.

Wie in den früheren Fällen, muss man sich auch hier vor Verallgemeinerung hüten, indem z. B. die Rhizome von Corallorhiza innata und Epipogon Gmelini mit Haaren besetzt sind.

Eine besondere Einrichtung finden wir noch bei Lathraea squamaria. Die eigentliche Wurzel ist unbehaart und nur jene Stellen machen hievon eine Ausnahme, welche mit einer fremden Wurzel in Berührung kommen. [1]) Bevor nämlich Lathraea ihre Haustorien treibt, wird sie vermittelst eines Haarbüschels an der Wurzel ihres Wirthes befestigt. Diese lokalisirte Bildung von Wurzelhaaren ist hier mehr dazu bestimmt, den Haustorien der Pflanze das Eindringen in eine fremde Wurzel zu erleichtern, als zur selbständigen Stoffaufnahme.

Eine ähnliche Behaarung der Haustorien fand ich bei Thesium pratense, wenn auch nicht so schön ausgebildet. Die genannte Erscheinung ist ein Analogon zu der Bildung jener Haarbüschel an Keimpflanzen, welche das Eindringen der Wurzel in den Boden zu unterstützen haben.

Aus den hier angeführten Thatsachen ersehen wir, dass bei verschiedenen Pflanzen unter Anpassung an die gegebenen Bedingungen eine Reduktion der Behaarung stattfindet. Dieselbe kann ihren Ausdruck finden in der Verringerung der Zahl der Haare, einem nur zeitweisen Auftreten derselben oder schließlich in dem gänzlichen Mangel dieser Organe.

Umgekehrt kann nun auch eine Anhäufung von Wurzelhaaren zu bestimmten Zwecken stattfinden, oder morphologisch verschiedene Organe können vermöge ihrer Anpassung an physiologische Zwecke mit Wurzelhaaren versehen werden.

Vor Allem gilt dies für die jungen Keimlinge mancher Pflanzen. Die hier in größerer Anzahl producirten Haare haben die Bestimmung, den Samen am Substrate zu befestigen und so das Eindringen der ersten Wurzel zu erleichtern. Eine schöne Ausbildung eines solchen besonderen Haarkranzes an der Grenze vom Hypocotyl findet sich nach den Angaben von Briosi [2]) bei Eucalyptus und mehreren anderen Myrthaceen. Es ist hier die äußerste Rindenschicht des Hypocotyls, welche sich in zahlreiche Haare auflöst; dieser Kranz von Haaren, die am Boden haften, wird von der Wurzel durchwachsen, welche durch diese Haare einen Widerhalt ge-

1) Vergl. H. Krause, Beiträge zur Anatomie der Vegetationsorgane von Lathraea squamaria. Diss. 1879. p. 14.

2) Sopra un organo di alcuni embryoni vegetali. 1882.

gen die Festigkeit der Erde erreicht. Einen ähnlichen Haarapparat fand ich bei den Keimlingen von Scabiosa atropurpurea.

Es war mir nun interessant zu wissen, ob bei Wurzeln, die sonst nur spärlich Haare trugen, vielleicht gerade anfangs die Haarproduktion begünstigt war. Thatsächlich fand ich etwas derartiges bei verschiedenen Alliumspecies. Samen, welche in mäßig feuchte Erde ausgesät wurden, hatten (bei Allium porrum) binnen 8 Tagen bis zu 3 cm lange Wurzeln getrieben, an denen durchgehends die Wurzelhaare fehlten, mit Ausnahme der Uebergangsstelle vom Wurzel- zum Stengeltheil. Es fanden sich hier entweder nur kurze Papillen oder auch wohl ausgebildete Haare, die unter Umständen eine Länge von 0.4 mm erreichten.

Eine besondere Einrichtung zur Anheftung der Samen fand ich ferner bei Panicum miliaceum und Setaria italica. Hier übernimmt die zuerst die Samenschale durchbrechende Coleorhiza die Produktion von Wurzelhaaren, und erst nachdem sich dieselben an Bodentheilchen festgeklebt haben, wird die Coleorhiza von der Wurzel durchbrochen. Am besten kann man diese lokale Produktion von Haaren an Samen beobachten, welche man auf Wasser schwimmend keimen lässt.

Wollte man noch weiter darnach suchen, würde man gewiss noch zahlreiche derartige Anpassungserscheinungen finden. Für gewöhnlich jedoch fehlt ein derartiger Apparat, und eine gewisse Anpassung äußert sich nur darin, dass die Basis der Primärwurzel in Bezug auf die Haarbildung den andern Theilen der Wurzel gegenüber etwas begünstigt ist. Die Wurzelhaare erreichen hier häufig eine größere Länge und bilden sich auch noch zahlreich in sehr feuchter Erde aus, während unter gleichen Umständen die Haare an dem späteren Zuwachs fehlen. Die Ursache davon mag in einem anfänglich zu Gebote stehenden Nahrungsüberschuss liegen. Ich konstatirte diese Erscheinung an Brassica napus, Biscutella auriculata, Vesicaria sinuata, Beta orientalis, Aster chinensis und Anderen.

Wir sahen an dem Beispiele von Panicum und Setaria, dass morphologisch anderswerthige Pflanzentheile die Produktion von Wurzelhaaren übernehmen können. In größerem Umfange geschieht dies dort, wo der Pflanze eine eigentliche Wurzel fehlt und die Nährstoffaufnahme durch eigens dazu angepasste Stengelorgane vermittelt wird.

Nach der Angabe von Nägeli und Leitgeb[1]) fehlen die eigentlichen Wurzeln bei Psilotum triquetrum (einer Lycopodiacee) vollständig, und eigens dazu metamorphosirte Stengelorgane haben die Funktion derselben übernommen. Unter Anpassung an diese Funktion sind diese Stengel befähigt, Wurzelhaare zu produciren.

Etwas ganz Analoges haben wir bei den Rhizomen von Corallo-

---

1) Entstehung und Wachsthum der Wurzeln in Nägeli's Beiträgen zur wissenschaftlichen Botanik. Heft IV. 1868. p. 147.

rhiza innata und Epipogon Gmelini, deren Stengelnatur von Hofmeister [1]) und Reinke [2]) bewiesen wurde.

Bei den Hymenophyllaceen wird das Aufsaugen der flüssigen Nahrung entweder durch Wurzeln oder durch metamorphosirte Stengel ausgeführt, und beide tragen Wurzelhaare. [3]) Die Wurzelhaare der Stengel unterscheiden sich von den echten Wurzelhaaren nur dadurch, dass sie nicht bloß Äste einer Epidermiszelle, sondern durch eine Querwand von dieser getrennt sind. Mettenius gab den Stengelhaaren den Namen Haarwurzeln im Gegensatz zu den Wurzelhaaren. Da wir mit dem Ausdruck Wurzel einen bestimmten Begriff verbinden, ist wohl die Bezeichnung von Mettenius fallen zu lassen, wie dies auch schon von Prantl [4]) geschehen ist.

Die hier angeführten Fälle der Wurzelhaarbildung an Stengeln sind nur Ausnahmen von der Regel, dass Wurzelhaare bei den höheren Pflanzen nur an Wurzeln vorkommen. [5]) Es trifft dies auch dann noch zu, wenn die betreffenden Organe anderweitige Metamorphosen zu Knollen oder Rhizomen erlitten haben. Die Knollen von Dahlia scapigera, von Ranunculus ficaria sind Gebilde der Wurzeln und tragen als solche Wurzelhaare. Die Rhizome und Knollen von Convallaria latifolia, Adoxa moschatellina, Cyclamen neapolitanum, Solanum tuberosum entbehren als Stengelgebilde der Wurzelhaare, obgleich die Wurzeln dieser Pflanzen behaart sind. Ebenso wenig tragen die Ausläufer von Aster leucanthemus und Polygonum bistorta Wurzelhaare.

Die Entstehung von Wurzelhaaren an Blättern finden wir — abgesehen von den Moosen — bei Salvinia natans. [6]) Dies sogenannte Wasserblatt weicht von der Form der übrigen Blätter vollständig ab und ähnelt dem Aussehen nach einer Wurzel. Es trägt wohl ausgebildete Wurzelhaare.

Zum Schluss bleibt uns noch übrig, jene Pflanzen aufzuzählen, bei welchen ich Wurzelhaare konstatirt habe. Wie wir aus dieser Tabelle ersehen, sind in derselben sowohl die verschiedensten Familien vertreten, als auch Gewächse von vollständig ungleichartiger Lebensweise. Es ist hierbei keine Rücksicht genommen, ob die Wurzel viel oder wenig Haare producirt, sondern es kommt nur die Fähigkeit der Wurzelhaarbildung in Betracht. [7])

---

1) Hofmeister, Allgemeine Morphologie d. Gewächse. 1868. p. 427.

2) Reinke, Zur Kenntniss des Rhizoms von Corallorhiza und Epipogon. Flora, 1873. p. 164.

3) Citirt nach G. Mettenius, Über die Hymenophyllaceae. Abhandl. d. sächsischen Gesellschaft d. Wissenschaften. Bd. VII. 1864. p. 408.

4) K. Prantl, Untersuchungen z. Morphologie d. Gefäßkryptogamen. Heft I. 1875. p. 34.

5) Nachträglich fand ich noch eine weitere Ausnahme, indem aus dem Samen hervorsprossende Stengeltheile von Pisum sativum ebenfalls Wurzelhaare producirten, wenn man sie 3—4 Wochen lang mit feuchten Sägespänen bedeckt hielt.

6) Citirt nach Luerssen, Medicinisch-pharmaceutische Botanik 1879. Bd. I. p. 591.

7) Die Anordnung der Familien ist nach dem Eichler'schen Syllabus geschehen.

Gymnospermae.

Coniferae:

Abies abovata.

Taxaceae:

Salisburia adiantifolia.
Taxus baccata.

Monocotyleae.

Liliaceae:

Allium ampeloprasum.
- cepa.
- fistulosum.
- neapolitanum.
- porrum.
- triquetrum.

Bellevallia comosa.
Convallaria latifolia.
- polygonatum.

Dracaena indivisa.
Gagea lutea.
Hyacinthus amethystinus.
Lilium candidum.
Muscari monstrosa.
- botryoides.

Scilla campanulata.
- peruviana.

Uropetalum serotinum.

Commelinaceae:

Tradescantia erecta.
- virginica.

Araceae:

Philodendron dipinnatifidum.
Scindapsus pinnatus.

Najadaceae:

Potamogeton pusillum.
Zanichellia palustris.

Cyperaceae:

Carex paludosa.
Eriophorum angustifolium.
Heleocharis palustris.
Scirpus silvaticus.

Gramineae.

Avena nuda.
- orientalis.
- sativa.

Bromus secalinus.
Hordeum vulgare.
- vulgare coeleste - trifurcatum.

Panicum miliaceum.
Poa pratensis.
Secale cereale.
Setaria italica.
Sorghum sacharatum.
Triticum amyleum.
- sativum.
- spelta.
- vulgare.

Zea mais.

Orchidaceae:

Goodyera repens.
Gymnadenia conopsea.
Listera ovata.
Ophrys arachnites.
Orchis morio.
- odoratissima.

Alismaceae:

Sagittaria sagittaefolia.

Hydrocharitaceae:

Hydrocharis morsus ranae.
Hydromystria stolonifera.
Stratiotes aloides.
Vallisneria spiralis.

Dicotyleae.

Cupuliferae:
Alnus glutinosa.
Castanea vesca.
Fagus silvatica.
Quercus pedunculata.

Salicaceae:
Populus canadensis.
Salix fragilis.

Urticaceae:
Cannabis sativa.
Morus alba.
Urtica canadensis.

Polygonaceae:
Polygonum bistorta.
- fagopyrum.
Rumex crispus.

Chenopodiaceae:
Beta vulgaris.
Chenopodium botrys.

Amarantaceae:
Amarantus caudatus.

Caryophyllaceae:
Mesembryanthemum tricolor.

Portulacaceae:
Portulaca grandiflora.

Ranunculaceae:
Anemone appenina.
Ranunculus asiaticus.
- ficaria.
- repens.

Nymphaeaceae:
Nuphar luteum.

Papaveraceae:
Chelidonium majus.
Papaver rhoeas.

Fumariaceae:
Fumaria officinalis.

Cruciferae:
Biscutella auriculata.
Brassica napus.
- nigra.
Raphanus raphanistrum.
Sinapis alba.
Vesicaria sinuata.

Malvaceae:
Malva silvestris.

Oxalidaceae:
Oxalis corniculata.
- tropaeoloides.

Linaceae:
Linum usitatissimum.

Balsaminaceae:
Impatiens balsamina.

Sapindaceae:
Aesculus hippocastanum.

Vitaceae:
Vitis aestivalis.

Euphorbiaceae:
Euphorbia lathyris.
- peplis.
Ricinus communis.
- sanguineus.

Callitrichaceae:
Callitriche autumnalis.
- verna.

Buxaceae:
Buxus sempervirens.

Crassulaceae:
Sedum Rhodiola.
- Andersoni.

Crassulaceae :

Sempervivum Funkii.

Saxifragaceae :

Saxifraga sarmentosa.
- elatior.

Cactaceae :

Cereus peruvianus.
Opuntia Rafinesciana.

Onagraceae :

Oenothera taraxifolia.
Trapa natans.

Lythraceae :

Lythrum salicaria.

Myrtaceae :

Eucalyptus globulus.

Papilionaceae :

Cicer arietinum.
Ervum lens.
Lupinus albus.
- luteus.
Ornithopus sativus.
Phaseolus communis.
- multiflorus.
Pisum sativum.
Robinia pseudacacia.
Vicia faba.

Primulaceae :

Cyclamen neapolitanum.
Primula japonica.

Asperifolieae :

Anchusa italica.
Cynoglossum officinale.

Solanaceae :

Solanum tuberosum.

Scrophulariaceae :

Euphrasia vulgaris.

Scrophulariaceae :

Linaria vulgaris.
Melampyrum silvaticum.
Mimulus luteus.
Veronica beccabunga.

Labiatae :

Lamium album.

Acanthaceae :

Acanthus spinosus.

Cucurbitaceae :

Cucurbita pepo.

Rubiaceae :

Galium dumetorum.
Rubia tinctorum.

Caprifoliaceae :

Adoxa moschatellina.

Valerianaceae :

Valeriana phu.

Dipsaceae :

Asterocephalus sp.
Knautia arvensis.
Scabiosa graminifolia.
- atropurpurea.

Compositae :

Achillea ochroleuca.
Aster chinensis.
- leucanthemus.
Calendula crista galli.
- micrantha.
Cichorium intybus.
Dahlia scapigera.
Helianthus annuus.
Inula helenium.
Pyrethrum Wilmottii.
Senecio vulgaris.

Santalaceae :

Thesium intermedium.
- pratense.

Anatomie der Wurzelhaare.

Ursprung der Haare. — Präformirte Zellen. — Form der Wurzelhaare. — Der einzelnen Pflanze inhärente Formen. — Veränderung der Wurzelhaare durch äußere Einflüsse. — Contactwirkungen. — Hemmungen durch den Contact. — Anderweitige Reizwirkungen. — Nutation der Haare. — Veränderung der Haarform ohne Contact mit festen Körpern. — Im dampfgesättigten Raum. — In Wasser und concentrirten Nährlösungen. — Wechsel der äußeren Bedingungen. — Übersicht der auf verschiedene Art erzielten Haarformen. — Veränderung der Wurzelhaarlänge. — Constante Länge der Wurzelhaare.

Bekanntlich sind die Wurzelhaare fast ausschließlich nur Ausstülpungen der äußersten Zellschicht des Organes, auf welchem sie entstehen. Bei den meisten Pflanzen, so bei sämmtlichen Phanerogamen, bleibt das Haar ein solcher Zellast, und nur in sehr wenigen Ausnahmsfällen wird dasselbe durch das Auftreten einer Querwand von der Mutterzelle getrennt.

Bei den von mir untersuchten Prothallien von Alsophila australis, Aspidium molle, Coenopteris foenicula entsteht das Rhizoid als Ast einer grünen Zelle, in welchen nur farbloses Protoplasma oder höchstens nur sehr wenige Chlorophyllkörner einwandern. Dieser Seitenast wird schon sehr zeitig durch eine Querwand abgetrennt, wodurch ein weiteres Vordringen der Chlorophyllkörner verhindert wird. Diese Wand liegt immer an der Basis des Rhizoids und lässt dasselbe dem Thallus wie aufgesetzt erscheinen. Manchmal kann sie auch fehlen. Aus den Zeichnungen Bauke's (Botanische Zeitung 1880) muss ich ein Gleiches auch für andere Farnprothallien annehmen. Dieselbe Art der Haarbildung finden wir bei den unterirdischen Stengeln der Hymenophyllaceen.

Ferner schließt sich hier die Bildung der Rhizoiden von Blyttia Lyellii und der Borstenhaare von Metzgeria an. [1])

Eine Ausnahme von der exogenen Entstehung der Haare ist nach meinen Erfahrungen ausschließlich nur bei Marchantia polymorpha, Lunularia vulgaris und Corsinia marchantioides zu finden. Wie schon Gasparrini [2]) 1856 beschrieben, entspringen die normalen Haare hier ebenfalls aus der äußersten Zellschicht. Bei einer Verletzung derselben wächst jedoch die darunter befindliche Zelle in das erstgebildete Haar hinein. So ein sekundäres Rhizoid kann noch ein tertiäres in sich tragen.

---

1) Vgl. Leitgeb, Untersuchungen über die Lebermoose. Heft III. p. 37 und Heft II. p. 36.

2) G. Gasparrini, Richerche sulla natura dei succiatori. 1856. p. 23. Taf. I und II. Neuerdings haben Kny und Böttcher diese endogene Rhizoidenbildung näher beschrieben in den Sitzungsber. d. bot. Vereins d. Prov. Brandenburg. XXI. 1878.

Das Auswachsen der Wurzelhaare erfolgt, wie wir schon oben pag. 165 gezeigt haben, in akropetaler Reihenfolge, ohne dass dabei eine bestimmte Stellung oder Anordnung der Haare zu bemerken wäre.

Nur in einigen wenigen Fällen gehen die Haare aus besonderen, von den übrigen Oberflächenzellen verschiedenen Zellen hervor. Dieselben sind zumeist an ihrem größeren oder geringeren Umfang deutlich zu erkennen. Derartige kleinere Zellen (meist nur $^1/_3$—$^1/_2$ so groß als die umliegenden) finden sich bei Nuphar luteum, Sagittaria sagittaefolia, Elodea canadensis, wo sie schon an der Wurzelspitze angelegt werden. Erfolgt kein Auswachsen zu Haaren, so verwischt sich nach und nach der Unterschied zwischen den einzelnen Zellen. Bei Hydromistria stolonifera[1]) und Hydrocharis morsus ranae[2]) sind schon unter der Wurzelhaube gewisse Zellen durch ihren größeren Umfang und ihre Tiefe — sie ragen in die Rinde hinein — besonders kenntlich gemacht. Dieselben wachsen später zu Wurzelhaaren aus.

Die hinlänglich bekannten präformirten Zellen von Lunularia und Marchantia brauche ich hier nicht weiter zu erwähnen.

Bei Corallorhiza[3]) werden Wurzelhaare nur an bestimmten papillös hervorragenden Stellen producirt und stehen in Folge dessen zu Gruppen vereinigt nur an bestimmten Punkten des Rhizoms. Etwas Ähnliches findet sich nach den Angaben von Nägeli und Leitgeb[4]) bei den Wurzeln von Lycopodium. Von der Epidermiszelle werden durch schiefe Wände keilförmige Zellen abgeschnitten, die sich wieder in je 3 Zellen theilen. Da nun jede derselben zu einem Haare auswächst, erklärt sich die Erscheinung, warum die Haare zumeist in Dreizahl bei einander stehen.

Nachdem wir bisher den Ursprung der Haare betrachtet haben, bleibt uns nur noch übrig, die Form derselben näher ins Auge zu fassen.

Im Vergleich zu der außerordentlichen Mannigfaltigkeit der Haare an den in Luft ragenden Pflanzentheilen bieten die Wurzelhaare schon vermöge ihrer Einzelligkeit nur geringere Formverschiedenheiten. Sie zeichnen sich jedoch dadurch aus, dass ihre Gestalt durch äußere Bedingungen in ziemlich weitgehender Weise modificirt und abgeändert werden kann.

Wir müssen daher unterscheiden zwischen den konstanten Formen, welche den Haaren einer bestimmten Pflanze inhärent sind, und

---

1) Nach Angabe v. Kny, Sitzungsber. d. bot. Vereins d. Provinz Brandenburg. 1878. (26. April).

2) Vgl. Pfeffer, Arb. d. Würzb. Instituts. Bd. I. p. 79.

3) Vgl. Reinke, l. c. p. 164.

4) Entstehung und Wachsthum der Wurzeln, in: Beiträge zur wissenschaftlichen Botanik. 1868. Heft IV. p. 124.

jenen Formen, welche dem Wurzelhaar durch bestimmte äußere Einflüsse inducirt werden.

Zu ersteren gehören die Zäpfchenrhizoiden der Marchantiaceen, welche ich als bekannt voraussetzen darf. Dieselben entsprechen nach der Ansicht Leitgeb's [1]) den gleichmäßig verdickten Rhizoiden von Cyathodium und den Borstenhaaren, welche wir bei Monoclea und einigen Riccieen wiederfinden. Desgleichen zeigen die Haare von Stratiotes aloides nach den Angaben von Kny [2]) an ihrem basalen Theile korallenförmige Membranverdickungen, welche in das Innere der Zellen hineinragen. Dieselben werden gebildet, noch bevor sich die Außenwand der Zelle emporgewölbt hat, oder doch unmittelbar nachher.

Eine Membranverdickung nach außen war bisher an Wurzelhaaren noch nicht beobachtet. Ich fand derartige Haare jedoch bei Taxus baccata und habe sie auf Tafel I, Fig. 14 abgebildet. Es sind kleine warzenförmige Hervorragungen, welche gleichmäßig dicht über die ganze Oberfläche des Haares vertheilt sind, und dem Wurzelhaare dadurch ein eigenthümliches Aussehen verleihen. Außer diesen Haaren kommen bei Taxus keine anderen Haare vor.

Viel mannigfaltiger sind die Formen, welche durch äußere Einflüsse hervorgerufen werden. Ein Blick auf unsere Tafeln genügt, um uns hievon zu überzeugen; wir sehen hier knieförmig gebogene, verzweigte, handförmig ausgebreitete, geschlängelte und aufgeblasene Haare, die alle nur durch die Einwirkung des umgebenden Mediums, oder durch einen Wechsel desselben hervorgerufen wurden.

Die ursprüngliche Form des Haares ist immer nur der gerade Schlauch, der senkrecht auf die Längsaxe der Wurzel weiter wächst. Zur Veränderung dieser ursprünglichen Gestalt ist durchgehends ein kräftiges Wachsthum und eine dem entsprechende Menge von Nährstoffen nothwendig. An einer abgeschnittenen Wurzel bleiben die Haare unverändert, desgleichen wenn ein Mangel an Nährstoffen eintritt.

Wir haben vor Allem zu unterscheiden zwischen den Formen, welche durch den Contact mit einem festen Körper hervorgerufen werden, und den Formen, welche durch den Einfluss von Wasser und Luft ohne Contact mit festen Körpern bedingt sind.

Fassen wir zunächst die erste Kategorie ins Auge.

Was geschieht, wenn ein Wurzelhaar senkrecht auf eine feste unverrückbare Wand stößt? Es biegt unter einem rechten Winkel ab und wächst längs der Wand weiter. Man kann dies am besten sehen, wenn man eine Wurzel, etwa von Triticum vulgare, in einer engen Glasröhre wachsen lässt. Überall, wo das Haar auf die Glaswand stieß, sieht man es

---

1) Untersuchungen über die Lebermoose. Heft V. 1881.

2) Kny, Sitzungsberichte des bot. Vereins f. d. Prov. Brandenburg. 1878. (26. April).

rechtwinklig abgebogen. Der basale Theil des Haares ist dabei vollständig gerade geblieben. Es ist keine Ausbiegung vorhanden, etwa in der Art wie ein elastischer Stab ausbiegt, wenn er senkrecht gegen eine feste Wand gestoßen wird.

Wird der Widerstand, den ein derartiger fester Körper leistet, beseitigt, wächst das Wurzelhaar mit mehr oder weniger Abweichung in der früheren Richtung weiter, macht also eine zweite rechtwinklige Biegung.

Dieselben Umstände finden wir nun beim Wachsthum der Wurzeln im festen Boden wieder. Das Wurzelhaar stößt hier auf ein festes Körnchen. Es biegt aus und wächst längs seiner Oberfläche weiter. Hört der Contact auf, so wird es parallel seiner früheren Richtung, indem es die keinen Widerstand bietenden Luftlücken und Wasserspalten benutzt, vorwärtsdringen. Dieser Vorgang kann sich wiederholen, bis wir schließlich ein derartiges Bild bekommen, wie es in Fig. 3 a gezeichnet ist.

Das Wurzelhaar reagirt jedoch nicht immer in gleicher Weise. Es kann bei einem derartigen Hinderniss seine ursprüngliche Wachsthumsrichtung gänzlich aufgeben, sich an dem festen Körper fast scheibenartig verbreitern oder nach zwei oder mehreren Richtungen hin auswachsen. An Fig. 3 b sehen wir das Haar bei dem Aufstoßen auf ein Erdpartikelchen, das hier nicht mitgezeichnet ist, nach zwei Seiten weiter wachsen. Bei Fig. 7 stieß das Haar auf ein festes Erdklümpchen, einzelne Stellen des Haares wuchsen zu Ästen aus, welche das Bodenpartikelchen förmlich wie eine Hand festhalten.

Bei einem solchen Contact mit festen Körpern erleidet das Wachsthum des Wurzelhaares eine ziemlich bedeutende Hemmung, und es ist wahrscheinlich, dass eine derartige Hemmung das Auswachsen des Haares nach verschiedenen Seiten zur Folge hat.

Man kann sich von dem Gesagten am leichtesten überzeugen, wenn man die auf dem Boden eines Blumentopfes dahin kriechenden Wurzeln betrachtet. Am deutlichsten zeigt sich der Längenunterschied, wenn wir die Pflanzen in lockeren Sägespänen wachsen lassen, die den Wurzelhaaren nur wenig Widerstand entgegensetzen.

So stießen die Haare von Cicer arietinum in einer Entfernung von 0.1 mm auf die Wand des Blumentopfes, bogen dann rechtwinklig ab und wuchsen nur noch ungefähr 0.1 mm lang weiter. Sie wurden also im Ganzen 0.2 mm lang, während die in die Sägespäne ragenden Haare der entgegengesetzten Wurzelseite eine Länge von 0.8—1.1 mm erreichten.

Bei Zea mais wurden die Haare an der Contactseite 0.3—0.4 mm, ohne Contact 1.1—1.5 mm lang.

Etwas Analoges finden wir an den Luftwurzeln von Scindapsus pinnatus. Länge der Wurzelhaare an der Contactseite: 0.8 mm, an der freien Seite 1.2 mm.

Liegt die Wurzel der Wand sehr fest an, so kann das Auswachsen der Flächenzellen zu Haaren gänzlich unterdrückt werden.

Nach den Angaben Franke's [1]) tritt eine derartige Hemmung auch bei dem Verwachsen der Luftwurzeln von Hedera helix und Hoya carnosa ein. Die aneinanderliegenden Seiten zweier Luftwurzeln treiben Wurzelhaarpapillen, die, sobald sie aufeinanderstoßen, nicht mehr weiter wachsen und mit einander verkleben.

Wir ersehen aus dem hier Angeführten, dass auf das Wurzelhaar durch den Contact mit einem festen Körper ein gewisser Reiz ausgeübt wird, der vor Allem eine Hemmung des Längenwachsthums des Haares erzielt. Damit kann nun eine Veränderung der Form und Wachsthumsrichtung verbunden sein.

Wir haben es hier mit einer besonderen Art von Reiz zu thun, der nicht identisch ist mit der von Darwin entdeckten, aber noch nicht vollständig bewiesenen Reizwirkung von festen Körpern an den Wurzelspitzen. Bestreuen wir nämlich im feuchten Raume wachsende Wurzelhaare mit Sandkörnchen, so bleiben die Haare, wenn sie nicht mechanisch verletzt sind, vollständig gerade, ob nun die Sandkörnchen an der Spitze oder einem anderen Theile des Wurzelhaares haften. Ein Ätzen der Haare mit Höllenstein, wie dies Darwin an Wurzeln gethan, ist bei den Haaren nicht möglich, da dieselben hiedurch getödtet werden.

Nur unter der Bedingung, dass ein derartiger Reiz mangelt, können wir es uns erklären, warum die Haare in feuchter Erde gerade bleiben. Der Contact bleibt in feuchter Erde, nur vermag das Wurzelhaar die einzelnen Körnchen leicht bei Seite zu schieben, und da es durch die einfache Berührung nicht gereizt wird, bleibt es eben gerade.

Eine Ausnahme hievon machen die Wurzelhaare von Azolla caroliniana und Muscari botryoides. Dieselben erfahren zwar durch den Contact mit Schlammtheilchen keine Ablenkung von der ursprünglichen Wachsthumsrichtung, wohl aber werden die Haare im Schlamme gewunden und gedreht, während sie im Wasser, also ohne Contact, gerade bleiben.

Man könnte vielleicht glauben, dass die Beklebung der Wurzelhaare im trockenen Boden von Einfluss sei; dies ist jedoch nicht der Fall, da manche Haare, wie z. B. Tradescantia erecta, fast gar keine Beklebung zeigen, und trotzdem die für andere Pflanzen charakteristischen Formen aufweisen.

Ein wichtiger Faktor, der bei der Erklärung der Wurzelhaarform in der Erde eine Rolle spielt, sind die von dem Wurzelhaar ausgeführten nutationsartigen Krümmungen. Wir werden später auf die Bedingungen zurückkommen, unter welchen sie sich bilden. Ist nun ein Wurzel-

---

1) Beiträge zur Kenntniss der Wurzelverwachsungen in: Cohn's Beiträge zur Biologie der Pflanzen.

haar auf der Innenseite der Krümmung mit Erdpartikelchen beklebt, so kann dies leicht den Anschein erhalten, als ob das Haar durch diesen Contact abgelenkt worden wäre.

Diese nutationsartigen Krümmungen kommen ferner noch in Betracht, sobald zwei oder mehrere Wurzelhaare aneinander kleben. Die Fähigkeit der Wurzelhaare, sich spiralig zu winden, verbunden mit einem ungleichen Wachsthum der beiden Haare, veranlasst dieselben, sich gegenseitig zu umranken, wie wir dies in Fig. 11 und 12 wahrnehmen. Die Wurzelhaare können sich auch wieder trennen und andere Haare umschlingen oder, zu mehreren vereinigt, ein strickartiges Gebilde darstellen.

Am besten erhält man solche Verschlingungen, wenn man Keimpflanzen von Vicia faba oder Cicer arietinum in abwechselnd feucht und trocken gehaltenen Sägespänen cultivirt. In Sägespänen kommt das Aneinanderhaften der Haare leichter zu Stande, und zugleich befördert der Wechsel der Feuchtigkeit die Krümmungsfähigkeit der Haare.

Ähnliche gewundene Stränge hat auch schon W. P. Schimper[1]) an den Rhizoiden von Catharinea (Atrichum) undulatum und den nahestehenden Polytrichaceen beobachtet.

Nachdem wir also gesehen, welche Veränderungen die Gestalt der Wurzelhaare durch den Contact mit festen Körpern erleidet, kommen wir zu der Einwirkung von feuchter Luft und Wasser, die ebenfalls besonders beim Wechsel bestimmend für die Form der Wurzelhaare sind.

Anfänglich, so lange die Wurzelhaare eine gewisse Größe nicht überschreiten, sind sie ausnahmslos gerade, ob sie nun in Erde, Wasser oder im feuchten Raume wachsen. Diese zuerst gebildeten Strecken bleiben auch bei der späteren Entwickelung immer gerade, woher es kommt, dass sämmtliche Haare Krümmungen, Anschwellungen etc. niemals an ihrer Basis, sondern immer erst in einiger Entfernung von ihrem Insertionspunkte an der Wurzel zeigen.

Im dampfgesättigten Raume bleiben die Wurzelhaare sehr lange Zeit gerade, und nur gegen den Schluss ihres Wachsthums zeigen sie knieförmige Krümmungen, wie wir sie in Fig. 2 und 4 abgebildet haben (z. B. bei Sinapis alba). Es entstehen ausnahmsweise auch geschlängelte oder spiralig gedrehte Haare (z. B. bei Muscari botryoides, Fig. 10).

Diese Veränderungen müssen jedoch nicht eintreten, was uns z. B. Marchantia polymorpha beweist, wo die Rhizoiden selbst nach mehrwöchentlichem Aufenthalt im feuchten Raum gerade geblieben waren.

In Wasser bleibt die Mehrzahl der Wurzelhaare ebenfalls lange Zeit gerade und viele Pflanzen zeigen niemals Veränderungen.

Nur wenn ein reichlicher Nährstoffüberschuss die Wachsthumsthätig-

---

1) Recherches anatomiques et morphologiques sur les mousses. 1848. p. 18 und Taf. IV. Fig. 15—17.

keit erhöht, können besondere Formen entstehen. Bei Brassica napus (Fig. 4), Sinapis und Verwandten, bei Tradescantia kommen in Wasser knieförmige Krümmungen vor.

Bilden sich ausnahmsweise beim Mais im Wasser Wurzelhaare, so nehmen dieselben entweder eine geschlängelte Form an, ähnlich den Haaren von Muscari, oder es äußert sich der Einfluss des Wassers darin, dass sich zäpfchenförmige Membranverdickungen bilden, welche in das Innere des Zelllumens hineinragen. Fig. 17 gibt uns ein Beispiel hievon.

Bei zahlreichen anderen Pflanzen bilden die Haare in Wasser ebenfalls Membranverdickungen, wenn auch nur an wenigen Stellen. Derartige mehr breite als zäpfchenförmige Verdickungen befinden sich besonders häufig an der Spitze des Wurzelhaares (Vgl. Fig. 2). Wächst ein unterliegender Ast des Haares weiter, bleibt die Verdickung an der Biegungsstelle zurück (Fig. 4).

Bei der Aussaat von Marchantia-Brutknospen auf Wasser entstehen korkzieherartig gedrehte Rhizoiden, welche jedoch keineswegs sehr regelmäßig gewunden sind. Schon die Spitze des Rhizoids ist gebogen und durch Fixirung derartiger Nutationskrümmungen kommen Bilder zu Stande, wie wir sie in Fig. 15 vor uns haben.

Sind in dem zur Kultur verwendeten Wasser gar keine anorganischen Nährstoffe enthalten, so zeigen die Rhizoide zuweilen blasige Auftreibungen.

Ein Mittel, alle Krümmungen und Formdifferenzen deutlicher zu machen, besteht darin, dass man statt des gewöhnlichen Brunnenwassers oder destillirten Wassers eine mehr weniger concentrirte Nährstofflösung[1]) verwendet.

Ich variirte meist zwischen einer Lösung von 1—10 Gramm Salz auf 1000 ccm Wasser. Da es hier nur auf die osmotische Leistung des Salzes ankommt, kann man auch Lösungen von Kochsalz, salpetersaurem Kalk oder Kali verwenden, wodurch die Pflanzen jedoch leichter geschädigt werden, als durch eine Nährstofflösung.

In Lösungen von 1—4 pro mille Salz zeigten sich die Wurzelhaare nur schwach gebogen, spiralig gewunden und geschlängelt, oder mit jenen schon oben erwähnten knieförmigen Biegungen versehen.

Eine concentrirtere Lösung hemmt das Längenwachsthum der Wurzelhaare sehr bedeutend, wofür jedoch ihr Dickenwachsthum stark begünstigt wird. Würde das Haar vollständig gleichmäßig in die Dicke wachsen,

---

1) Dieselbe bestand aus:

4 Theilen salpeters. Kalk
1 Thl. - Kali.
1 - phosphors. Kali
1 - schwefels. Magnesia.

müsste eine Kugel entstehen. Dies findet nur selten und nur in sehr concentrirten Lösungen (20 $^{0}/_{00}$) statt.

Dagegen zeigen die Haare häufig zuerst normales Wachsthum, dann vergrößert sich ihr Durchmesser, sie werden förmlich aufgeblasen, dann wieder schmäler, bis sich wieder eine Auftreibung zeigt. Dieser Vorgang kann sich oftmals hintereinander wiederholen, wodurch dann derartige Formen zu Stande kommen, wie wir sie in dem nebenstehenden Holzschnitt Fig. 1 und auf Taf. I, Fig. 16 abgebildet haben. Die letztere

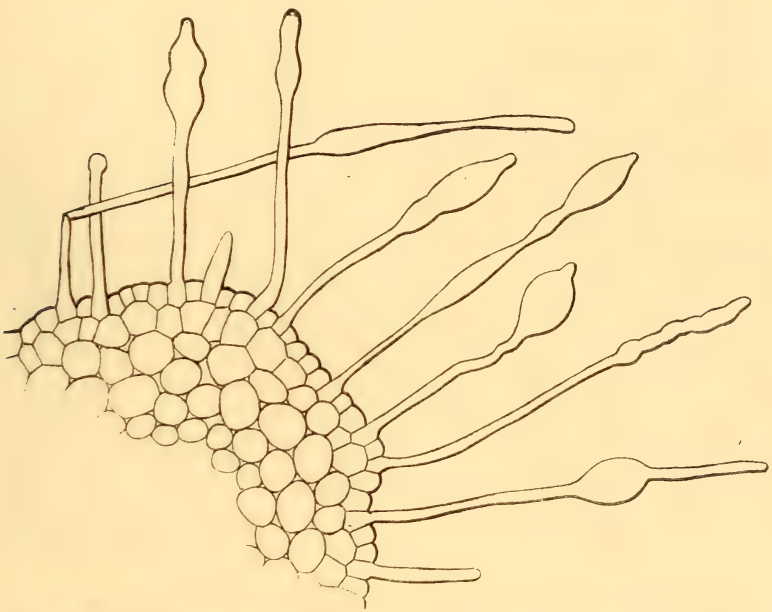


Fig. 1. Die Wurzelhaare von Avena sativa, in einprocentiger Nährstofflösung gewachsen; 98fach vergrößert.

Zeichnung stammt von der Wurzel eines Brassica-Keimlings, die in einer 2procentigen Chlorcalciumlösung wuchs; Fig. 1 (Holzschnitt) ist einer Haferpflanze entnommen, deren Wurzeln sich in einer 1procentigen Nährstofflösung befanden. Die Bildung der Wurzelhaare war hier durch die Nutation der Wurzel sehr gefördert.

Aus dem bisher Angeführten ersehen wir, wie bei konstanten äußeren Bedingungen sich nach und nach Einflüsse geltend machen, welche zu einer Formveränderung der Haare führen. In viel höherem Maße geschieht dies beim Wechsel der äußeren Bedingungen. Kommen Haare aus Wasser in feuchte Luft, so kollabiren dieselben. Dagegen werden große Formdifferenzen erzielt beim umgekehrten Versetzen aus feuchter Luft in Wasser, oder noch besser in concentrirte Nährstofflösungen.

Am interessantesten ist die Erzielung von verzweigten Wurzel-

haaren durch diesen Wechsel äußerer Bedingungen, wodurch zu gleicher Zeit die in der Literatur nur vereinzelt angegebenen Auszweigungen der Haare ihre Erklärung finden. Bei kräftiger Entwickelungsfähigkeit der Wurzelhaare sind wohl die Haare der meisten Pflanzen befähigt, sich zu verzweigen, wenn auch gewisse Pflanzen, wie z. B. Brassica napus, besonders dazu geneigt sind. Es kann sich hiebei entweder der Scheitel dichotomisch theilen (Holzschnitt Fig. 2, 3), oder etwas unterhalb des

Fig. 2. Wurzelhaare von Brassica napus, 98fach vergrößert.

Fig. 3. Wurzelhaare von Brassica napus, 98fach vergrössert.

Scheitels entstehen mehrere (Fig. 9) oder nur ein (Fig. 8) Seitenast. In destillirtem Wasser werden die Formen viel schlanker (Fig. 2), als wenn die Wurzeln in concentrirte Nährstofflösungen gebracht wurden (Fig. 3).

Außer der Verzweigung der Wurzelhaare werden durch den Wechsel des Mediums in ausgezeichneter Weise noch alle übrigen bisher genannten Formen erzeugt, besonders aber die aufgeblasenen und gedrehten Haare. Bei den Wurzelhaaren von Hordeum und Zea mais ist auch eine lokale Verdickung der Membran nicht selten. An den Rhizoiden von Farnprothallien werden ähnliche Gestaltsveränderungen hervorgerufen, und auch die für Mastigobryumhaare angegebenen Verzweigungen rühren vermuthlich gleichfalls von Feuchtigkeitsdifferenzen her, wie denn die Wurzel überhaupt im Boden häufig einem derartigen Wechsel ausgesetzt ist. Ist der Boden ausgetrocknet und wird er sodann plötzlich begossen, muss dies ähnlich wirken, als ob die Wurzeln aus einem feuchten Raume in Wasser

versetzt würden. Es entstehen dann Verzweigungen, Krümmungen unabhängig vom Contact mit dem Boden.

Zur allgemeinen Übersicht reihe ich eine Zusammenstellung jener Formen an, welche die Wurzelhaare unter äußeren Bedingungen annehmen können:

1) Das Wurzelhaar ist ein geradliniger Zellast;
2) knieförmig; das Wachsthum der Wurzelhaarspitze erleidet eine Hemmung, und unter derselben wächst eine Ausstülpung weiter (Fig. 2). Zugleich kann an der Wurzelhaarspitze und Biegungsstelle eine Membranverdickung stattfinden (Fig. 2 und 4);
3) geschlängelt; entsteht, indem sich mehrere knieförmige Biegungen aneinander reihen (Fig. 13);
4) dichotomisch verzweigt (Holzschnitt Fig. 2 und 3), monopodial verzweigt (Fig. 8, 9), die einzelnen Äste können dabei gerade oder gebogen sein, oder auch aufgetrieben (Fig. 1);
5) gebogen, d. h. nur die Spitze des Haares ist gekrümmt;
6) spiralig; je nachdem die Spirale eng oder weiter gewunden ist, unterscheiden wir verschiedene Unterformen (Fig. 10, 15);
7) rankend; zwei oder mehrere Haare umschlingen sich gegenseitig (Fig. 11, 12);
8) aufgetrieben. Das Wurzelhaar zeigt an verschiedenen Stellen oder nur an einer (Spitzentheil) kugelförmige Anschwellungen, welche einen 3—4 fach größeren Durchmesser haben können (Fig. 16, Holzschnitt Fig. 1), als das normale Haar. Die Auftreibungen sind oft auch unregelmäßig (Fig. 1).

Ebenso wie die Form ist bis zu einem gewissen Grade auch die Länge der Wurzelhaare von äußeren Bedingungen abhängig. Außerdem kommt noch jeder Pflanze eine specifische Entwickelungsfähigkeit ihrer Wurzelhaare zu, weshalb die Wurzelhaare verschiedener Pflanzen unter denselben Bedingungen nicht immer gleich lang sind.

Am längsten werden die Wurzelhaare im feuchten Raume, und wenn das Wachsthum der Wurzel durch Nutation u. s. w. besondere Hemmungen erleidet. So erreichten die Wurzelhaare von Pisum sativum im feuchten Raume eine Länge von 2.5 mm, während sie in Erde durchschnittlich immer kürzer blieben. Ebenso waren die Haare von Avena sativa in Wasser bei einer starken Nutationskrümmung der Wurzeln bis zu 4.7 mm lang, während sie sonst ohne Nutationskrümmung nie länger als 1—2 mm wurden.

Verminderung resp. Vermehrung der Erdfeuchtigkeit wirkt nicht auf alle Pflanzen gleichmäßig ein. Ein Theil der Pflanzen besitzt bei sehr trockenem Boden, ein anderer Theil bei feuchtem Boden

längere Haare. Es machen sich hier wahrscheinlich zwei ungleichsinnig wirkende Faktoren geltend. Erstens Vergrößerung der Wachsthumsfähigkeit der Haare bei reichlichem Luftzutritt und geringerer Feuchtigkeit, zweitens die Hemmungen, welche durch den Widerstand eines festen Bodens an den Haaren hervorgebracht werden.

Je nachdem der eine oder der andere Faktor überwiegt, wird das Resultat ein anderes sein.

Die Anzahl der gebildeten Haare steht mit der Länge derselben in keinem bestimmten Zusammenhang.

Vicia faba.

Länge der Wurzelhaare.			Breite der Wurzelhaare.
1) In sehr feuchter Erde	0.24 mm	(Mittel aus 15 Mess.)	0.013—0.018
2) In etwas weniger feuchter Erde	0.28 mm	(- - 22 -)	0.014—0.02
3) In trockener Erde	0.52 mm	(- - 42 -)	0.02 —0.025

Die Länge der Wurzelhaare wurde an den verschiedensten Stellen der Wurzel bestimmt.

Pisum sativum.

Länge der Wurzelhaare.			Breite der Wurzelhaare.
1) In feuchter Erde	0.33 mm	(Mittel aus 27 Mess.)	0.013—0.018
2) In weniger feuchter Erde	0.50 mm	(- - 21 -)	—
3) In trockener Erde	0.68 mm	(- - 30 -)	0.013—0.018

Die durchschnittliche Breite der Wurzelhaare variirt nicht bedeutend.

Tradescantia erecta.

Länge der Wurzelhaare.		Breite der Wurzelhaare.
1) In sehr feuchter Erde	1.9—2.4 mm	0.011—0.014 mm
2) In mäßig feuchter Erde	1.1—1.9 mm	0.14 —0.033 mm
3) In trockener Erde	0.8—1.3 mm	desgl.

Die Dicke der Haare nimmt mit steigender Feuchtigkeit ab, während die Länge zunimmt.

Avena sativa.

Länge der Wurzelhaare.		Breite der Wurzelhaare.
1) In feuchter Erde	1.1—1.9 mm	0.008—0.013 mm
2) In mäßig feuchter Erde	0.8—1.3 mm	0.011—0.018 mm
3) In trockener Erde	0.5—1.1 mm	0.013—0.018 mm

Wie wir schon oben angedeutet, ist die Maximallänge, welche die Wurzelhaare der einzelnen Pflanzen erreichen können, verschieden.

Abgesehen von dem unbeschränkten Längenwachsthum der Laubmoosrhizoiden, finden wir die längsten Wurzelhaare bei Marchantia, die im feuchten Raume eine Länge von 18 mm erreichten.

Bei Phanerogamen fand ich die größte Länge der Wurzelhaare bei

Trianea bogotensis (in Wasser) 8 mm,
Potamogeton sp. (in Wasser) 5 mm,
Elodea canadensis (in Schlamm) 4 mm,

denen sich

Gymnadenia conopsea (in Erde) mit 3.5 mm anschloss.

Die folgenden Zahlen waren Pflanzen entnommen, deren Wurzeln im feuchten Raum, also unter sehr günstigen Bedingungen wuchsen, dabei wurde auf eine nur ausnahmsweise eintretende Hypertrophie der Haare keine Rücksicht genommen.

Tradescantia erecta	3,2 mm.	Vicia faba . . .	0.8 mm.
Brassica napus .	3.0 -	Cicer arietinum . .	0.7 -
Ophrys arachnites	2.6 -	Taxus baccata . .	0.6 -
Pisum sativum .	2.5 -	Convallaria latifolia	0.5 -
Avena sativa .	2.5 -	Muscari botryoides	0.5 -
Ranunculus ficaria	1.5 -	Primula japonica	0.35 -
Panicum miliaceum	1.1 -	Sorghum sacharatum	0.3 -
Allium triquetrum	1.0 -	Abies abovata . .	0.15 -
Lilium candidum	0.9 -		

Die Breite der Wurzelhaare schwankt innerhalb viel engerer Grenzen, und da dieselbe durch äußere Bedingungen oft sehr verändert wird, lassen sich schwer sichere Zahlen angeben. Zumeist entspricht einer größeren Länge auch eine größere Breite, wobei häufig die Basis des Haares dicker ist, als die Spitze desselben.

Figurenerklärung zu Tafel I.

Fig. 1 ($^{98}/_{1}$) Sinapis alba. Die Wurzeln wurden aus dem dampfgesättigten Raum in eine $15^{0}/_{00}$ Nährstofflösung versetzt.
Fig. 2 ($^{260}/_{1}$) Biscutella auriculata. Die Wurzeln wurden aus einer Lösung von $5^{0}/_{00}$ salpetersaurem Kalk in destillirtes Wasser übertragen.
Fig. 3 ($^{98}/_{1}$) Tradescantia erecta. In sehr trockener Erde erzogen.
Fig. 4 ($^{260}/_{1}$) Brassica napus. Bei Kultur in Wasser.
Fig. 5 (stark vergrößert) Triticum vulgare. Beklebung eines Wurzelhaares mit Bodenpartikeln.
Fig. 6 ($^{98}/_{1}$) Brassica napus. Das Haar einer in trockener Erde gewachsenen Wurzel.
Fig. 7 ($^{98}/_{1}$) – – Die Wurzel war in sehr trockener Erde gewachsen.
Fig. 8 ($^{98}/_{1}$) Cicer arietinum. Die Wurzel kam aus dem feuchten Raum in Leitungswasser.
Fig. 9 ($^{98}/_{1}$) Brassica napus. Aus dampfgesättigtem Raum in $10^{0}/_{00}$ Nährstofflösung.
Fig. 10 ($^{150}/_{1}$) Muscari botryoides v. odorans. Die Haare einer in Erde gewachsenen Wurzel.
Fig. 11 ($^{150}/_{1}$) Cicer arietinum. Die Wurzel wurde aus dem feuchten Raum in Leitungswasser übertragen.
Fig. 12 ($^{185}/_{1}$) Vicia faba. Die Wurzeln waren zwischen Sägespänen gewachsen.
Fig. 13 ($^{110}/_{1}$) Panicum miliaceum. In dampfgesättigter Luft.
Fig. 14 ($^{270}/_{1}$) Taxus baccata. Haare einer im Freien gewachsenen Pflanze.
Fig. 15 ($^{67}/_{1}$) Marchantia polymorpha. Die Brutknospen waren auf einer Lösung von $10^{0}/_{00}$ Nährstoff kultivirt.
Fig. 16 ($^{98}/_{1}$) Brassica napus. Die Wurzeln befanden sich in einer Lösung von $20^{0}/_{00}$ Chlorcalcium.
Fig. 17 ($^{270}/_{1}$) Zea mais. Die Wurzeln waren in destillirtem Wasser kultivirt.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.

Fig. 1.

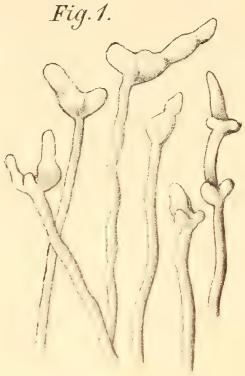


Fig. 2.

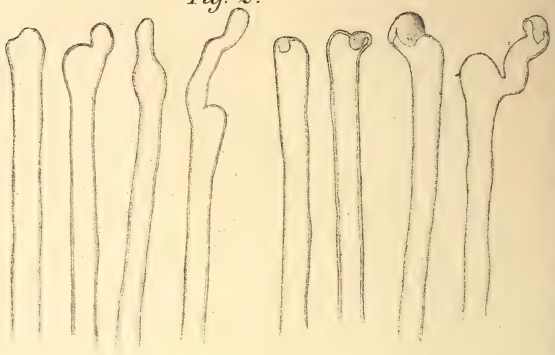


Fig. 3.

Fig. 4.

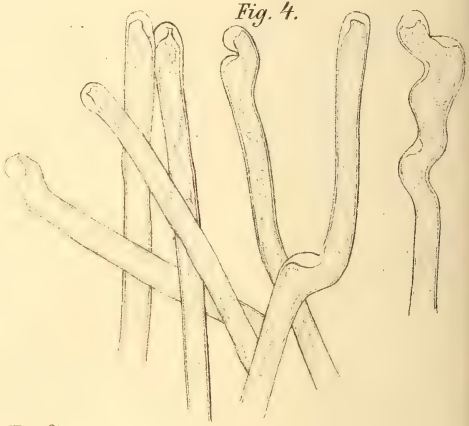


Fig. 5.

Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 8.

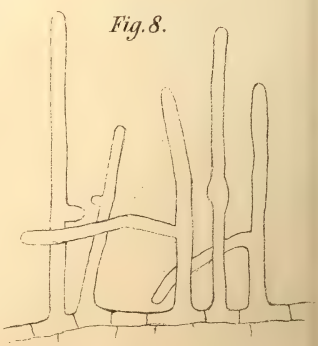


Fig. 9.

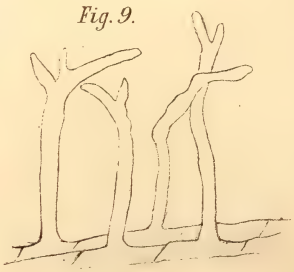


Fig. 10.

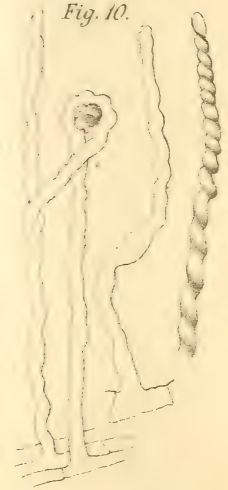
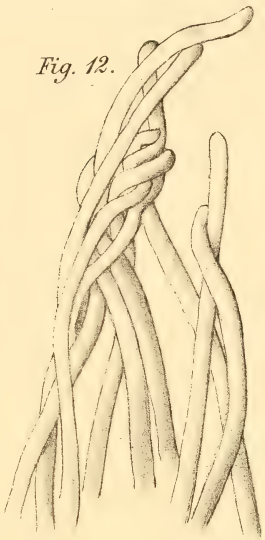


Fig. 11.

Fig. 12.



ig. 13.

Fig. 14.

Fig. 15.

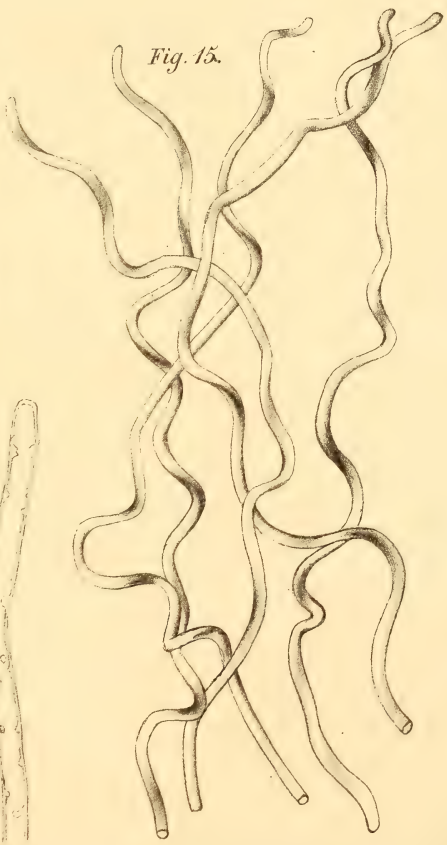


Fig. 16.

Fig. 17.

Lith. Anst. v. J. G. Bach, Leipzig.

Fig. 1.

Fig. 2.

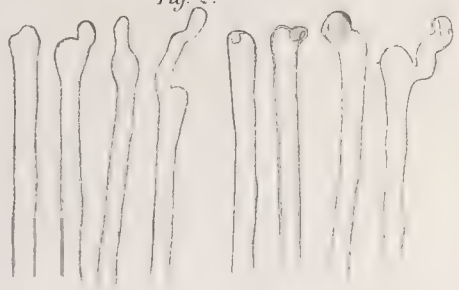


Fig. 10.

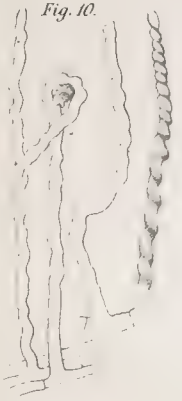


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 3.

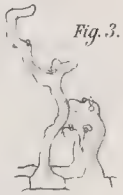


Fig. 4.

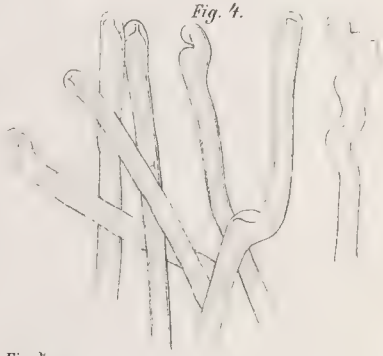


Fig. 13.

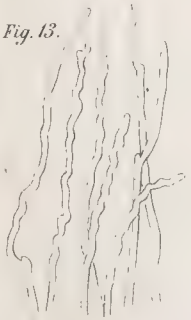


Fig. 14.

Fig. 15.

Fig. 6.

Fig. 7.

Fig. 5.

Fig. 8.

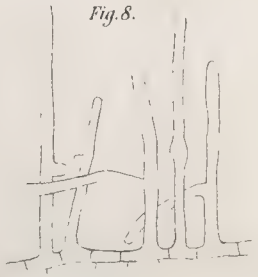


Fig. 9.

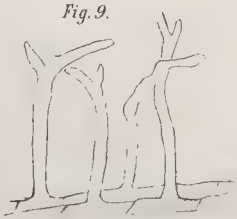


Fig. 16.

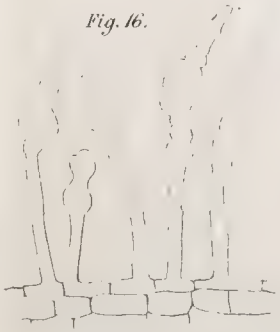
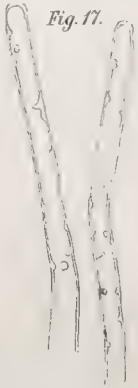


Fig. 17.



Thesen.

I.

Die Eintheilung der pflanzlichen Gewebe nach physiologischen Principien ist practisch nicht durchführbar.

II.

Die Umwandlung der Bacterien unter verschiedenen äusseren Bedingungen findet nur innerhalb der Species statt, ohne dass eine Species in die andere übergehen könnte.

III.

Die wesentlichen Vorgänge in den Organismen sind von den in unbelebten Körpern sich abspielenden Processen nicht blos graduell sondern fundamental verschieden.

SMITHSONIAN INSTITUTION LIBRARIES
3 9088 00624 7258